

REPORTE DEL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE A NIVEL NACIONAL MEDIANTE EL USO DE DATOS DE SENSORES REMOTOS

VI.0 2007-2022

LÍNEA BASE HISTÓRICA

Gustavo Francisco Petro Urrego
Presidente de Colombia

Francia Márquez
Vicepresidenta de Colombia

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

María Susana Muhamad González
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Lilia Tatiana Roa Avendaño
**Viceministra de Políticas y Normalización
Ambiental**

Mauricio Cabrera Leal
**Viceministro de Ordenamiento Ambiental del
Territorio**

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

Ghisliane Echeverry Prieto
Directora general

Lina María Caballero Villalobos
**Subdirectora de Ecosistemas e Información
Ambiental**

Jhon Edison Nieto Vargas
Coordinador del Grupo de Bosques

Edersson Cabrera Montenegro
**Coordinador Sistema de Monitoreo de
Bosques y Carbono (SMBYC)**

INSTITUTO GLOBAL PARA EL CRECIMIENTO VERDE - GGGI

Frank Rijsberman
Director General

Helena McLeod
Directora General Adjunta

Tatiana Escovar
Representante Andina

Iván Darío Valencia
**Coordinador de políticas
GGGI Colombia**

AUTORES

Lina Katerine Vergara Chaparro
Gustavo Galindo García
Alejandra Ruiz Díaz

COORDINACIÓN EDITORIAL

GGGI

Alejandra Ruiz Díaz
Asociada sénior REDD+

Nataly Vargas
Coordinadora de Comunicaciones

IDEAM

Andrés Felipe Tapiero Ríos
Coordinación editorial

Sebastián Uribe Rodríguez
Adriana Mantilla Esparza
Asistencia editorial

Producción editorial

.Puntoaparte Editores
Corrección de estilo

Valentina Álvarez - GGGI
Kevin Palacios - GGGI
Diseño

GGGI
Shutterstock.com
Fotografías

Esta publicación es posible gracias al apoyo de la
Embajada de Noruega en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO)

Blady Nhaydú Bohórquez Carvajal
Experta en REDD+ y Manejo Forestal Sostenible
Programa ONU-REDD

Adriana Patricia Yepes Quintero
Experta REDD+ - América Latina / Asesora Técnica
Principal GCF Colombia Equipo para Detener la
Deforestación, la Degradación y las Emisiones
(HaltDDef)
División Forestal

Erith Alexander Muñoz Ríos
Experto Regional en Teledetección para América
Latina y El Caribe

Daniel Fernando Guerrero Machado
Equipo SEPAL ROMA
División de Actividad Forestal

Especialmente, al proyecto GCF Visión Amazonía
'Pago por Resultados REDD+ Colombia 2015-2016'

Cítese como: Vergara, L. K., Galindo, G. y Ruiz, A. (2024). *Reporte del monitoreo de la restauración del bosque a nivel nacional mediante el uso de datos de sensores remotos. Línea base histórica 2007-2022*. Versión 1. 0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto Global para el Crecimiento Verde (GGGI).

Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam
Septiembre del 2024, Bogotá, D. C., Colombia.

ISBN (digital): 978-958-5489-29-5

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).

CONTENIDO

1.	CONTEXTO	7
2.	ALCANCE Y CONSIDERACIONES	9
3.	CONCEPTOS UTILIZADOS PARA EL REPORTE DE LA RESTAURACIÓN	11
4.	RESULTADOS DEL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE 2007-2022	13
	RESULTADOS A NIVEL NACIONAL	13
	RESULTADOS POR REGIONES NATURALES	22
	ANEXO: FICHA METODOLÓGICA DEL REPORTE DE MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE CON SENSORES REMOTOS A NIVEL NACIONAL	24
	BIBLIOGRAFÍA	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrategias definidas en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF para cada uno de los tres enfoques de restauración incluidos en el PNR **12**

Figura 2. Áreas con estrategia de manejo forestal sostenible (MFS) en 2018, año de implementación, y en 2023 **13**

Figura 3. Número de áreas y superficie (ha) reportadas con iniciativas de restauración potencial del bosque por estrategia de restauración (recopiladas para el análisis de la línea base 2007-2022). **14**

Figura 4. Número de áreas y superficie (ha) con iniciativas de restauración potencial del bosque, según el año de implementación reportado (recopiladas para el análisis de la línea base 2007-2022). **15**

Figura 5. Algunos ejemplos de casos detectados en el reporte de las áreas con procesos de restauración durante el proceso de análisis de la línea base 2007-2022. **17**

Figura 6. Superficie total reportada con procesos de restauración potencial a bosque por periodo vs. la superficie con evidencia de restauración en las imágenes de satélite (ganancia de cobertura de bosque o vegetación leñosa) para cada periodo. **20**

Figura 7. Densidad de áreas recopiladas para la línea base 2007-2022 vs. áreas con evidencia de restauración del bosque. **21**

Figura 8. Número de áreas y superficie (ha) en proceso de restauración del bosque reportadas entre 2007 y 2022 por región natural **22**

Figura 9. Superficie total reportada con procesos de restauración potencial a bosque por región natural vs. la superficie con evidencia de restauración en las imágenes de satélite (ganancia de cobertura de bosque o vegetación leñosa) para cada región natural. **23**

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

CDB: Convención Marco de Naciones Unidas de Biodiversidad Biológica

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Conpes: Consejo Nacional de Política Económica y Social

COP: Conferencia de las partes (referidas al CMNUCC y CDB)

DNP: Departamento Nacional de Planeación

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

GEI: Gases de efecto invernadero

GGGI: Instituto Global de Crecimiento Verde (Global Green Growth Institute)

Ideam: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IFN: Inventario Forestal Nacional

Ipbes: Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático

Minambiente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Minagricultura: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

NDC: Contribución Determinada a Nivel Nacional (Nationally Determined Contribution)

NIR: Infrarrojo cercano

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PND: Plan Nacional de Desarrollo (PND)

PNR: Plan Nacional de Restauración, Recuperación y Rehabilitación de Ecosistemas degradados

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

SER: Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica

SMBYC: Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono

SNIF: Sistema Nacional de Información Forestal

SWIR: Infrarrojo de onda corta

1. CONTEXTO

La restauración de los ecosistemas, incluidos los bosques y paisajes, es una de las estrategias claves para afrontar los retos del cambio climático, la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y el mantenimiento sostenible de los servicios ecosistémicos para el beneficio de la biodiversidad y el bienestar humano (Cohen-Shacham et al., 2016). La Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró el decenio 2021-2030 como la Década de las Naciones Unidas para la Restauración de Ecosistemas, con el objetivo de fomentar y crear conciencia de la importancia de una restauración exitosa y contribuir al cumplimiento del Convenio de Diversidad Biológica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Gann et al., 2019; ONU, 2019).

En 2015, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) presentó el Plan Nacional de Restauración, Rehabilitación y Recuperación de Ecosistemas Degradados (PNR). Este instrumento es una iniciativa de acción a veinte años para orientar y promover la restauración ecológica, la recuperación y la rehabilitación de áreas disturbadas, en un marco amplio de conservación de la biodiversidad y de adaptación a los cambios globales. Una parte integral del PNR es la implementación de estrategias de monitoreo a nivel nacional, regional y local en el mediano y largo plazo (Minambiente, 2015).

De otro lado, la Política Nacional para el Control de la Deforestación y Gestión Sostenible de los Bosques (Conpes 4021 de 2020) asignó al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), con apoyo de Minambiente y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Minagricultura), la tarea de liderar el diseño y la implementación de cuatro módulos de seguimiento del recurso forestal, entre los que se incluye un módulo para el monitoreo de las áreas en proceso de restauración (DNP, 2020).

Con el objeto de dinamizar las acciones de restauración en el país y cumplir con los compromisos globales adquiridos, se han establecido metas ambiciosas que generen impacto en la recuperación de los ecosistemas afectados, la biodiversidad y las poblaciones humanas. Es así como el portafolio del reporte actualizado de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por su sigla en inglés)

de Colombia¹, presentado a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) incluye la adopción de medidas para masificar la restauración de áreas de ecosistema boscoso degradado, dañado o destruido, con una meta de 962.615 ha restauradas a 2030 (Gobierno de Colombia, 2020).

En concordancia con lo anterior, la Ley 2169 de 2021, por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país, decreta que el sector ambiental deberá adoptar soluciones basadas en la naturaleza en áreas boscosas y ecosistemas degradados, incluidas la restauración ecológica, la recuperación, la rehabilitación, la protección y el uso sostenible; bajo esta directriz, se apunta a la restauración de por lo menos un millón de hectáreas acumuladas en 2030. Adicionalmente, dicha norma define la estructura del Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático (SNICC), en el que se incorpora al Sistema de Monitoreos de Bosques y Carbono (SMBByC) del Ideam como parte del mecanismo de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de mitigación a nivel nacional. Finalmente, en línea con los retos nacionales, el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026 establece la meta de incrementar las áreas en restauración, recuperación, rehabilitación y reconversión productiva en 753.000 ha (DNP, 2022) mediante la formulación y puesta en marcha de la Estrategia Nacional de Restauración 2023-2026.

En cumplimiento de las directrices establecidas en el Conpes 4021, el Ideam, con el apoyo del Instituto Global de Crecimiento Verde (GGGI), diseñó e implementó el módulo de monitoreo de la restauración forestal del SMBByC, articulado con el Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) y el Inventario Forestal Nacional (IFN). Como resultado de esta iniciativa, se elaboró y publicó el *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques mediante el uso de sensores remotos aplicable a otras coberturas forestales* (Vergara et al., 2023). Este instrumento establece los lineamientos metodológicos para el monitoreo con sensores remotos y la elaboración de los reportes nacionales y subnacionales acerca de la extensión (superficie) de la restauración del bosque en Colombia, de manera articulada con la información generada por el SMBByC (Ideam).

¹ El reporte NDC suscribe los compromisos que los países adquieren para combatir el cambio climático y alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. A partir de 2020 se debe actualizar cada cinco años.

El monitoreo propuesto en el protocolo permite realizar el seguimiento de la efectividad y la persistencia de las acciones implementadas y complementar los reportes de los compromisos globales frente al cambio climático. La metodología planteada hace uso de las ventajas que ofrecen las imágenes satelitales para llevar a cabo un monitoreo espacialmente coherente de áreas extensas, en tiempos relativamente cortos y con menores costos (Bey et al., 2016; Decuyper et al., 2022; McKenna et al., 2023; Sacande et al., 2021). De este modo, es posible generar indicadores para determinar el éxito de la restauración forestal a nivel nacional, las contribuciones en el logro de las metas y la persistencia de las implementaciones realizadas.

Como parte del diseño e implementación de este protocolo, se elaboró la línea base histórica del seguimiento de la restauración del bosque para el periodo 2007-2022. En este reporte, se presentan los resultados del monitoreo para el nivel nacional, desagregado por regiones naturales y considerando los siguientes intervalos: 2007-2014, 2015-2018, 2019-2022. Igualmente, se incluyen las definiciones adoptadas para el análisis, los alcances y las consideraciones que se deben tener en cuenta para la interpretación de los datos y una ficha técnica con la metodología empleada.

Río Amazonas



2. ALCANCE Y CONSIDERACIONES



1

El monitoreo se realizó dentro de las áreas reportadas con actividades de restauración en las que potencialmente se puedan llegar a reestablecer coberturas de bosque, recopiladas de distintas fuentes. La cantidad y la extensión de estas áreas podrá variar en la medida en que se incorporen nuevos registros históricos y actuales.



2

El análisis se realizó para identificar la superficie con evidencia de restauración del bosque. En los subsiguientes reportes, se incluirá el monitoreo de otras coberturas forestales.



3

Se utilizó la definición de bosque adoptada por Colombia para el cumplimiento de los compromisos adquiridos frente al cambio climático, de manera que los datos fueran consistentes con los demás reportes de SMBYC. Acorde con este referente, el monitoreo se realizó en las áreas con procesos de restauración iguales o superiores a 1 ha y áreas entre 0,5 ha y 1 ha que tuvieran continuidad con superficies de bosque existentes o con otras áreas en restauración del bosque.



4

Teniendo en cuenta que la restauración del bosque es un proceso gradual, se detectó la ganancia –y la eventual pérdida– de la cobertura de bosque o de vegetación leñosa (VL) que potencialmente puede llegar a convertirse en bosque, en razón a que esta última estaría presente en las primeras etapas del proceso.



5

Como insumo principal, se utilizaron imágenes satelitales de mediana resolución. Adicionalmente, y de acuerdo con la disponibilidad, se emplearon datos de sensores remotos de alta y muy alta resolución para detectar las ganancias que tienen lugar en las etapas iniciales del proceso y para la verificación y evaluación del mapa.



6

Puede existir un retraso entre el inicio de las actividades de restauración y la detección de la ganancia de las coberturas leñosas o bosques, teniendo en cuenta que en las imágenes de mediana resolución se pueden observar los cambios luego de que se haya acumulado suficiente material vegetal para ser detectado por los instrumentos del sensor. Se usaron las imágenes satelitales de alta y muy alta resolución disponibles para disminuir el tiempo de detección.



7

En los cálculos de superficie se aplicaron las metodologías recomendadas para el monitoreo de coberturas y cambios de cobertura de la tierra y para la estimación de los datos de actividad asociados a los reportes de cambio climático (Global Forest Observations Initiative [GFOI], 2020; Olofsson, 2018; Olofsson et al., 2013, 2014; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016; Stehman y Foody, 2019; Strahler et al., 2006). En consecuencia, los datos de superficie reportados corresponden a las áreas estimadas a partir de un muestreo estadístico y, por lo tanto, los valores no son iguales a los calculados directamente por el conteo de píxeles del mapa generado.



8

Para facilitar la interpretación de los datos reportados, se recomienda consultar la ficha metodológica anexa a este documento.



9

Los datos reportados corresponden al monitoreo de la línea base 2007-2022, a partir de las áreas compiladas de distintas fuentes. Los valores de los indicadores y datos presentados pueden cambiar en la medida en que se recopilen áreas adicionales para el mismo periodo y se actualice el monitoreo, según lo establecido en el *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques mediante el uso de sensores remotos aplicable a otras coberturas forestales*.

3. CONCEPTOS UTILIZADOS PARA EL REPORTE DE LA RESTAURACIÓN

El monitoreo de las áreas con restauración forestal se articula con el seguimiento de la superficie de bosque realizado por el SMByC del Ideam. Por lo tanto, se emplea la definición de bosque adoptada por el país para los reportes nacionales y globales.

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 del dosel de 30 %, una altura mínima del dosel *in situ* de 5 m en el momento de su identificación, y un área mínima de 1,0 ha. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria (Galindo et al., 2014; Ideam, 2019). Los manglares y otros bosques inundables hacen parte de la cobertura de bosque monitoreada.

Vegetación leñosa: tierra ocupada principalmente por árboles, arbustos, palmas nativas o bambusales naturales o antrópicos, cuya densidad de dosel se encuentra entre el 10 % y el 30 %, la altura del dosel *in situ* varía entre 0,5 m y 5 m en el momento de su identificación, y su extensión mínima es de 0,5 ha. En el monitoreo, la vegetación leñosa de interés es aquella que potencialmente podría llegar a convertirse en bosque.

Para el monitoreo de la restauración del bosque con sensores remotos, se establecen las siguientes definiciones:

Ganancia (restauración) de la cobertura de bosque: restablecimiento o ganancia de la superficie de cobertura de bosque dentro de las áreas destinadas y reportadas para tal fin, en sitios que presentan otro tipo de coberturas diferentes al bosque natural en el momento de implementar las actividades de restauración (Vergara et al., 2023).

Ganancia de cobertura de vegetación leñosa (que potencialmente puede llegar a convertirse en bosque): ganancia de superficie de vegetación leñosa dentro de las áreas destinadas y reportadas con procesos de restauración, en sitios que presentan otro tipo de coberturas en el momento de implementar las actividades de restauración, y que no corresponden a árboles o arbustos para la producción agropecuaria o plantaciones comerciales (Vergara et al., 2023).

Así mismo, se adoptan las definiciones de los enfoques de restauración incluidas en el PNR (Minambiente, 2015):

Restauración ecológica: actividad para restablecer el ecosistema degradado a una condición similar al ecosistema predisturbio en composición, estructura y función. Debe ser autosostenible y garantizar la conservación de especies y del ecosistema, así como de la mayoría de sus bienes y servicios.

Rehabilitación: actividad que permite llevar el sistema degradado a uno similar —o no— al predisturbio. Debe ser autosostenible, preservar algunas especies y prestar algunos servicios ecosistémicos.

Recuperación: actividad que permite recuperar algunos servicios ecosistémicos de interés social. Generalmente, los ecosistemas resultantes no son autosostenibles y no se parecen al sistema predisturbio.

Estrategias de restauración: el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente² y la plataforma SNIF del Ideam³ son las herramientas oficiales para el reporte de las áreas con procesos de restauración en Colombia. En estas plataformas, se registran las estrategias de intervención implementadas utilizando una tipología estandarizada para cada uno de los enfoques (figura 1); estas estrategias son la base para recopilar, organizar y seleccionar las áreas con procesos de restauración del bosque y de otras coberturas forestales.

² <https://cargue-informacion-restauracion-mads.hub.arcgis.com/>

³ <http://snif.ideam.gov.co/ideam-snif-web/>

Figura 1

Estrategias definidas en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF para cada uno de los tres enfoques de restauración incluidos en el PNR

Estrategias de implementación por enfoque

Recuperación o reclamación	Rehabilitación	Restauración ecológica
Remediación (X)	Cercas vivas / barreras (X)	Activa o asistida (enriquecimientos, manejo de regeneración natural) (✓)
Fitorremediación (X)	Sistemas agroforestales (X)	Pasiva o espontánea (aislamientos) (✓)
Revegetalización (—)	Corredor biológico (—)	
Obras biomecánicas (X)	P. F. Protectoras (—)	
	P. F. Protectoras productoras (—)	
	Manejo forestal sostenible (*)	
	Otras herramientas del paisaje (—)	

Nota: las estrategias que no conllevarían la restauración del bosque se marcan con (X); las que pueden derivar en el establecimiento de cobertura de bosque, con (✓); las que eventualmente podrían o no derivar en cobertura forestal, con una línea (—). El manejo forestal sostenible (*) puede incluir actividades de restauración del bosque, de aprovechamiento (pérdidas de bosque) y de conservación del bosque existente.

Antioquia, Colombia



4. RESULTADOS DEL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE 2007-2022

RESULTADOS A NIVEL NACIONAL

Superficie (ha) reportada con procesos de restauración del bosque

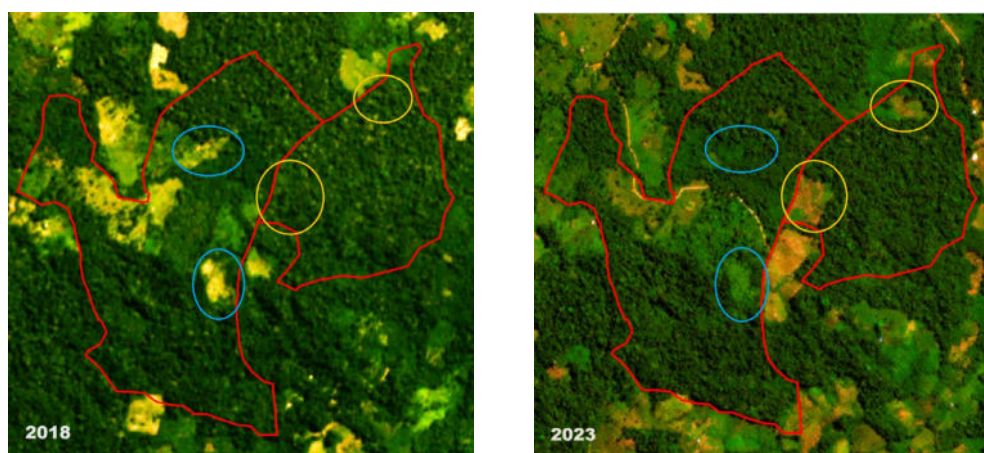
El monitoreo de la restauración del bosque se realizó en una extensión de 259.850 ha de áreas con procesos de restauración del bosque, reportadas con fecha de implementación entre 2007 y 2022 y con estrategias de restauración pasiva (natural o espontánea), restauración activa (asistida), plantaciones forestales protectoras, reforestación, corredores biológicos o revegetalización (esta última únicamente en los casos en los que se observó ganancia de coberturas de bosque).

Adicionalmente, se recopilieron 163.000 ha de restauración a otras coberturas forestales (cercas vivas, barreras rompeviento, plantaciones protectoras-productoras, agroforestales y silvopastoriles) que, si bien no se incluyeron en este primer análisis, serán evaluadas en los siguientes

reportes. De otro lado, se registraron 2.790.000 ha bajo estrategias de manejo forestal sostenible, las cuales se evaluarán de forma independiente, debido a que estos proyectos no se enfocan únicamente en intervenciones de restauración del bosque, sino que pueden incluir actividades de aprovechamiento forestal (figura 2). Así mismo, se recopilaron 10.600 ha asociadas a la restauración de ecosistemas de páramo y 5.200 ha de humedales o cuerpos de agua, lo que indica que la restauración en Colombia está enfocada, principalmente, en la recuperación de los bosques y el establecimiento de otras coberturas forestales.

Figura 2

Áreas con estrategia de manejo forestal sostenible (MFS) en 2018 (año de implementación) y en 2023



Fuente: Planet Scope (junio de 2018; julio de 2023).

Nota: las áreas de MFS incluyen zonas extensas donde ya existía cobertura de bosque, zonas de pérdida de bosque (círculos de color naranja), probablemente porque esta estrategia contempla el uso o aprovechamiento sostenible del bosque, y zonas en las que se está recuperando la cobertura forestal (círculos azules).







Respecto al tipo de intervención, el 93,8 % de la superficie recopilada para la línea base se reportó bajo el enfoque de restauración ecológica; específicamente, la restauración pasiva (también llamada natural o espontánea) fue la estrategia dominante en el país con el 82,5 % de la superficie total registrada. De otro lado, el 37,3 % de las áreas registradas se encuentran bajo estrategias de plantaciones forestales protectoras o reforestación, pese a que, en términos de superficie, ocupan menos del 2 % del total reportado.

No siempre se contó con información detallada de las intervenciones implementadas. Para el 10 % de la superficie total, se reportó únicamente el enfoque (recuperación, rehabilitación o restauración ecológica), pero no la estrategia específica; mientras que para el 1,5 % no se tiene información ni del enfoque ni de la estrategia, aunque se verificaron las intervenciones implementadas asociadas a proyectos de restauración del bosque (figura 3).

Figura 3

Número de áreas y superficie (ha) reportadas con iniciativas de restauración potencial del bosque por estrategia de restauración (recopiladas para el análisis de la línea base 2007-2022)

Cantidad de áreas reportadas		Estrategia de restauración	Superficie de las áreas reportadas	
%	n.º		(ha)	%
36,2	1.069	Restauración Pasiva	211.484	82,5
20,7	612	Restauración Activa	10.871	4,2
5,4	159	Restauración Ecológica (s. e.)	18.145	7,1
37,3	1.140	Reforestación / PFP / PFPP	7.471	1,5
0,4	12	Corredor Biológico	137	0,1
12,0	353	Rehabilitación (s. e.)	7.345	2,9
0,9	27	Revegetalización	178	0,1
0,6	19	Recuperación (s. e.)	266	0,1
11,1	328	Sin especificar	3.953	1,5

	Estrategias de Restauración Ecológica		Estrategias de Rehabilitación		Estrategias de Recuperación		No se reportó la estrategia
---	---------------------------------------	---	-------------------------------	---	-----------------------------	---	-----------------------------

Nota: las estrategias de restauración Ecológica (s. e.), Rehabilitación (s. e.) y Recuperación (s. e.), corresponden a las áreas en las que se reportó el enfoque de restauración, pero no la estrategia específica implementada. PFP: Plantaciones Forestales Protectoras. PFPP: Plantaciones Forestales Protectoras - Productoras.

Respecto a la fecha de implementación, la mayor parte de las áreas (57,4 %) se reportaron para los años 2014, 2018, 2019 y 2021, lo que corresponde a las fechas de consolidación del PNR (2014) y la puesta en marcha del aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente (2019). El 77,6 % de la superficie total se registró con fecha de implementación en el cuatrienio 2019-2022 y, específicamente, el 70,7 % en el año 2019 (figura 4).

Para el 2 % de la superficie (9,1 % de las áreas) no se contó con la información sobre la fecha de implementación de las acciones de restauración, aunque se verificó que las áreas corresponden a intervenciones recientes (figura 4). Al igual que con las estrategias, la fecha reportada no siempre coincide con la evidencia de las ganancias observadas en las imágenes de satélite (figura 5d).

Figura 4

Número de áreas y superficie (ha) con iniciativas de restauración potencial del bosque, según el año de implementación reportado (recopiladas para el análisis de la línea base 2007-2022)

Cantidad de áreas reportadas		Año reportado	Superficie de las áreas reportadas	
%	n.º		(ha)	%
3,0	112	2007	3.903	1,5
0,6	21	2008	56	0,0
1,3	48	2009	11.171	4,3
1,4	52	2010	1.715	0,7
2,9	109	2011	4.120	1,6
0,8	28	2012	298	0,1
1,3	48	2013	261	0,1
15,5	577	2014	6.641	2,6
7,0	260	2015	5.715	2,2
3,8	141	2016	3.658	1,4
5,3	197	2017	6.255	2,4
12,8	475	2018	9.664	3,7
16,0	594	2019	183.662	70,7
4,2	158	2020	4.221	1,6
13,1	489	2021	11.867	4,6
1,9	71	2022	1.752	0,7
9,1	339	Sin fecha	4.890	1,9

Nota: las áreas identificadas como "Sin fecha" corresponden a registros para los que no se tiene información acerca del año de inicio del proceso, pero que podrían corresponder al periodo de la línea base.

Finalmente, se recopilaron 903 áreas (192 ha) menores de 0,5 ha o entre 0,5 y 1 ha, que se encontraban aisladas de otras coberturas de bosque. De acuerdo con la definición de bosque adoptada, estas intervenciones no fueron incluidas en el análisis.

Resulta relevante señalar que el monitoreo de las áreas con procesos de restauración utilizando sensores remotos fue posible gracias a los esfuerzos realizados en los últimos años para la implementación y estandarización de las plataformas que recopilan los proyectos ejecutados por actores públicos y privados, así como a la información suministrada por algunas entidades. Sin embargo, existe aún un subregistro de los proyectos de restauración implementados en el país, o no siempre se cuenta con información geográfica de calidad de las áreas intervenidas para cuantificar la extensión y verificar o monitorear el avance de la restauración. Dentro de las causas de esta falta de datos, se encuentran:

1. No se cuenta con información de todas las entidades que, por normatividad, deben reportar las áreas con procesos de restauración o no siempre se reporta oportunamente.
2. El registro de las áreas en restauración para las demás entidades es de carácter voluntario, por lo que no se cuenta con información de todas las iniciativas históricas o en curso.
3. En otros casos no se tiene registro geográfico de las áreas intervenidas; únicamente se reportan datos alfanuméricos en tablas o registros de una coordenada (punto), lo que dificulta establecer la extensión de la intervención para el monitoreo.

4. En algunos casos, el registro geográfico es deficiente y se tienen áreas que no corresponden con lo observado en las imágenes. En otros casos, se reportan los predios o las áreas de proyectos completos, y no de las áreas específicas intervenidas, lo que afecta los resultados a la hora de medir la efectividad entre lo reportado y lo observado (figuras 5a y 5b).
5. No siempre se cuenta con la información básica asociada para el monitoreo, como la fecha de implementación y el enfoque o estrategia de la intervención.

Es importante, por lo tanto, fortalecer y fomentar un registro geográfico de las iniciativas estandarizado y de calidad, junto con información asociada que permita identificar el ecosistema que se desea recuperar, los enfoques y las estrategias implementados, la fecha de implementación, la duración del proceso y las especies utilizadas (cuando aplica). De igual forma, se requiere proporcionar datos socioeconómicos que sirvan de base para estimar los beneficios asociados e identificar las mejores estrategias costo-efectivas, además de otros insumos útiles para la toma de decisiones.

Una de las recomendaciones realizadas por las entidades que reportan las iniciativas es la documentación de los atributos que se deben registrar en las herramientas (especialmente las definiciones de las estrategias), puesto que, para usuarios no expertos en temas de restauración, no siempre es fácil diferenciarlas, lo que puede derivar en registros con información poco precisa (figura 5c). Otra propuesta es facilitar el cargue masivo de información en las aplicaciones existentes para las entidades que deben reportar un número considerable de proyectos.

Uramba en Bahía Málaga, Buenaventura



Figura 5

Ejemplos de casos detectados en el seguimiento de los áreas reportadas con procesos de restauración

a.



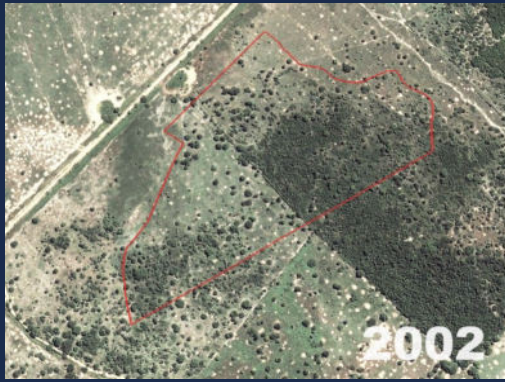
b.



c.



d.



Nota: a) reporte de áreas mayores a las realmente intervenidas y acciones de restauración que no persisten en el tiempo; b) áreas extensas en las que se reportan distintas estrategias para un mismo polígono y no es posible identificar las zonas específicas en las que se restaura el bosque; c) áreas reportadas con estrategia de revegetalización que corresponderían a una restauración activa, de acuerdo con la cobertura observada en las imágenes, las actividades realizadas y las especies utilizadas; adicionalmente, las imágenes de satélite sugieren que el área realmente intervenida es mayor que la reportada; d) ejemplo de un área con procesos de restauración en la que la fecha de implementación reportada no coincide con lo observado en las imágenes. Como fecha de implementación se reportó 2021, aunque las imágenes muestran que el proceso de restauración inició antes de 2015.

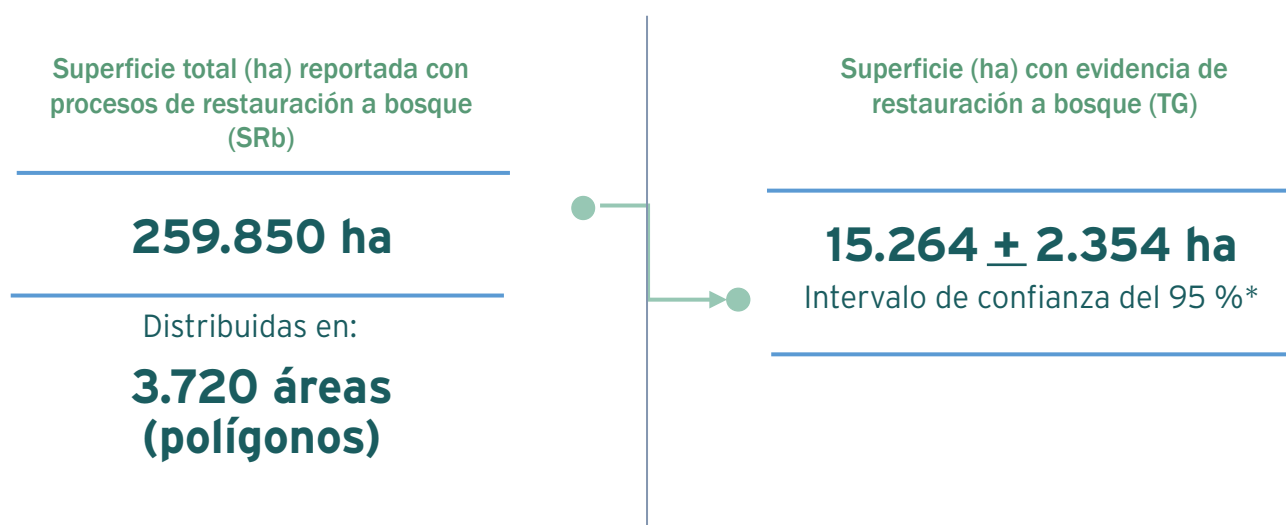
Amazonía colombiana





Oriente antioqueño, Colombia

Superficie (ha) con evidencia de restauración a bosque dentro de las áreas recopiladas



*La estimación de área se realizó con un tamaño de muestra (n) de 2.595. La exactitud global del mapa fue de 91 %.

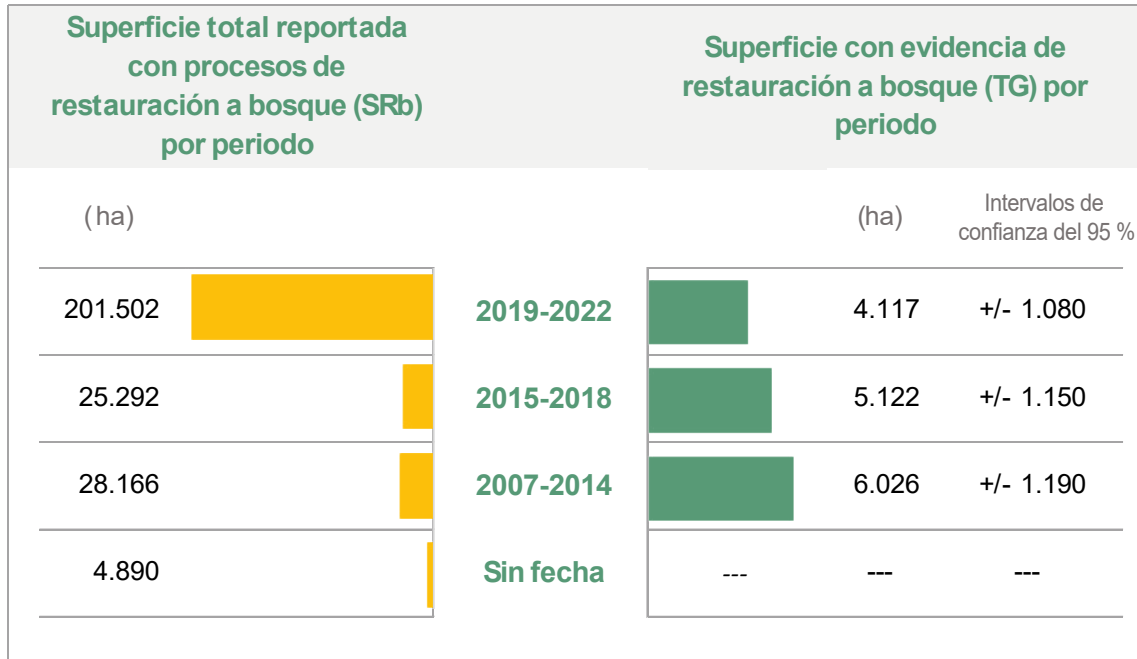
En las 259.850 ha recopiladas con iniciativas de restauración del bosque⁴, se identificaron 15.264 (+/- 2.354) ha con evidencia de ganancia de cobertura de bosque o vegetación leñosa (asociada a las etapas tempranas del proceso) persistente hasta 2022, es decir, menos del 10 % del área total reportada y recopilada. De la superficie ganada, cerca del 32 %, esto es, 4.921 (+/- 1.138) ha, se ha consolidado como cobertura de bosque, mientras que las áreas restantes se encuentran con vegetación leñosa.

En cuanto a la superficie con evidencia de restauración por cada periodo, el 39,5 % de la ganancia de vegetación leñosa y bosque se detectó en 2007-2014, el 33,5 % en 2014-2018 y el 27 % en 2019-2022. Por el contrario, la mayor parte de la superficie con procesos de restauración reportados corresponde al periodo 2019-2022 (77,6 % del total del área recopilada), seguido de 2014-2018 (10,8 %) y 2007-2013 (9,7 %). Este resultado indica que el área reportada en cada periodo no necesariamente es proporcional o indicativa de la superficie efectivamente restaurada en la actualidad respecto a las coberturas de interés (figura 6).

⁴ Corresponde a las áreas recopiladas de distintas fuentes, con fecha de implementación entre 2007 y 2022, según lo reportado por las entidades. Para más detalles acerca de las fuentes de los datos, consultar la ficha metodológica.

Figura 6

Superficie total reportada con procesos de restauración potencial a bosque por periodo vs. la superficie con evidencia de restauración en las imágenes de satélite (ganancia de cobertura de bosque o vegetación leñosa) para cada periodo.



Dentro de los principales factores que pueden estar incidiendo en que el área detectada con evidencias de restauración se encuentre por debajo del área reportada se incluye:

- Existen áreas reportadas (polígonos) de mayor extensión que las realmente implementadas (p. e., se reporta el límite del predio o del proyecto en general, si bien el área efectiva en la que se desarrollan las acciones es menor a la informada).
- Igualmente, se recopilaban áreas de gran tamaño con más de cinco estrategias reportadas, en las que no es posible identificar dónde se implementarán acciones para recuperar el bosque u otras coberturas forestales y dónde se aplicarán otras estrategias (figuras 5a y 5b). Se recomienda, por lo tanto, solicitar a las entidades el reporte específico de las áreas intervenidas para cada estrategia y ecosistema por restaurar.
- Parte de los procesos iniciados no resultaron exitosos, lo que llevó a retornar hacia las coberturas o usos previos a la restauración (figura 5a).
- Puede existir un retraso entre la implementación de las acciones y la detección de las ganancias, especialmente para las zonas donde no se cuenta con imágenes de alta y muy alta resolución. De esta forma, es probable que en las áreas más recientes (2019-2022)

no se hayan implementado aún todas las acciones de restauración o no se hayan detectado las ganancias de las intervenciones recientes en la fecha de corte del análisis (2022).

- En el proceso de revisión de las áreas se observó que la fecha de inicio de la intervención reportada no siempre coincide con lo observado en las imágenes (figura 5d).

En cuanto a la distribución geográfica, las zonas donde se concentra una mayor cantidad de áreas (polígonos) reportadas con procesos de restauración del bosque (figura 7) son las siguientes:

- Noroccidente de Antioquia, en los municipios de El Bagre y Zaragoza (estribación occidental de la serranía de San Lucas).
- Centro de Bolívar y occidente del departamento del Magdalena, alrededor del complejo cenagoso de los municipios de Plato, Córdoba y Santa Bárbara de Pinto.
- Región oriental del departamento del Cauca, en la cordillera Central (sector de los municipios de El Tambo, Timbío, Sotaró, Popayán, Puracé, Silvia Piedad, La Sierra y La Vega).

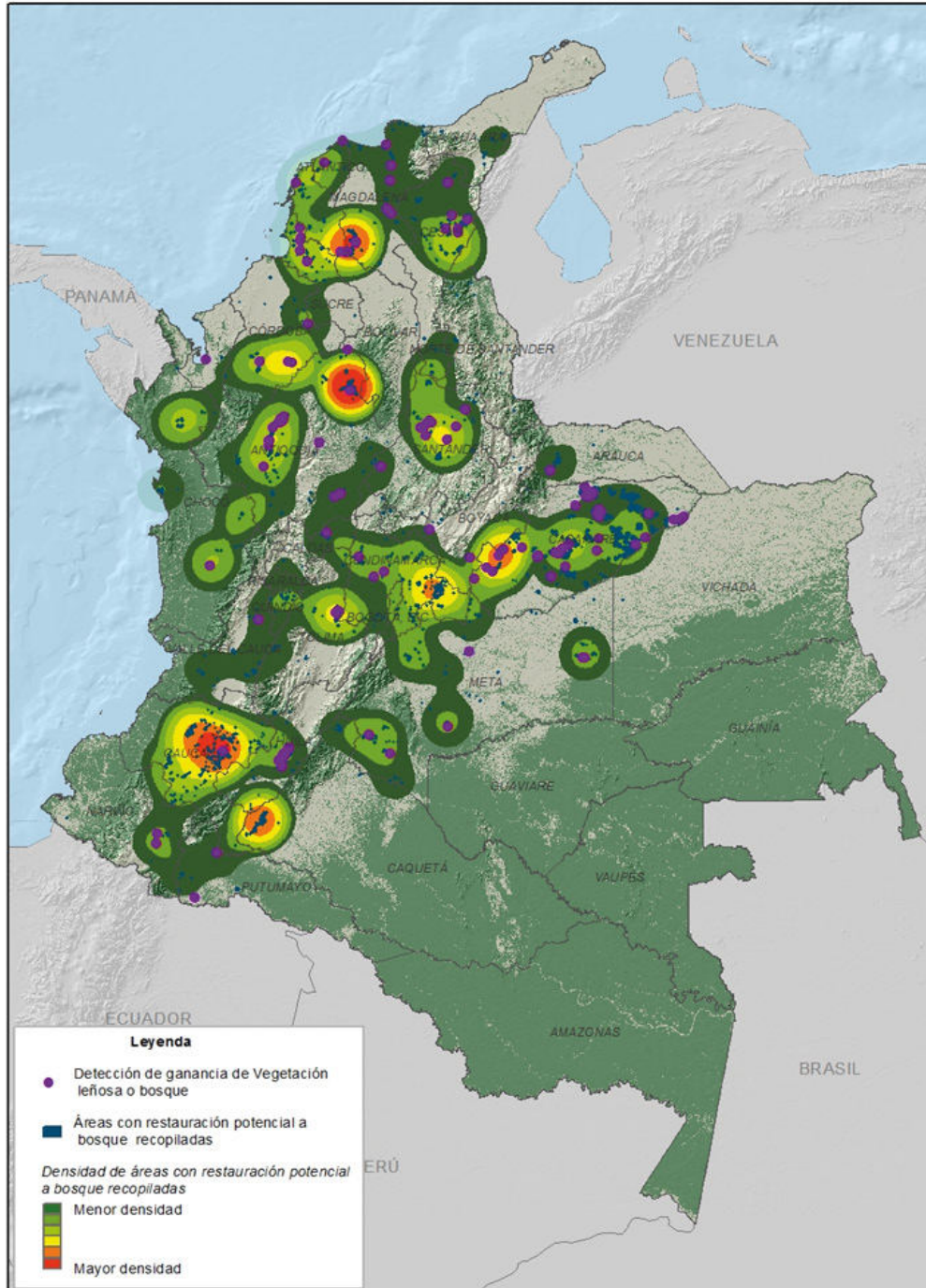
4. Oriente de Cundinamarca, entre el norte del Parque Nacional Natural Chingaza y el sector del Gavio (municipios de Ubalá, Gachalá, Junín y Gama).
5. Piedemonte amazónico, en el suroccidente del departamento de Caquetá (Belén de los Andaquíes y San José de Fragua).

6. Piedemonte del departamento del Casanare, en los municipios de Yopal, Aguazul y Tauramena.

Por su parte, la mayor cantidad de superficie con ganancia de cobertura de bosque y vegetación leñosa detectada en las imágenes de satélite se encuentra en los departamentos de Casanare, Antioquia, Huila, Santander, Magdalena y Cundinamarca (figura 7).

Figura 7

Densidad de áreas recopiladas para la línea base 2007-2022 vs. áreas con evidencia de restauración del bosque



Nota: la densidad de áreas reportadas con procesos de restauración de bosque se representa en colores verde oscuro a rojo, siendo las zonas naranjas y rojas las que presentan una mayor cantidad de reportes. En color púrpura se representan las zonas en las que se detectó mayor ganancia de vegetación leñosa y de bosque en las imágenes de satélite.

RESULTADOS POR REGIONES NATURALES

Superficie (ha) reportada en proceso de restauración del bosque por regiones naturales

El 69,5 % de la superficie de las áreas reportadas con procesos de restauración se encuentra en la Orinoquía (figura 8). Una parte corresponde a polígonos de gran extensión en los que se registran simultáneamente un conjunto de estrategias (restauración pasiva, activa, agroforestal, herramientas del paisaje, etc.) y en donde predominan las coberturas de pastizales naturales (sabanas), con menor proporción de bosque de galería (figura 5b), por lo que el área con restauración específica del bosque debe ser menor.

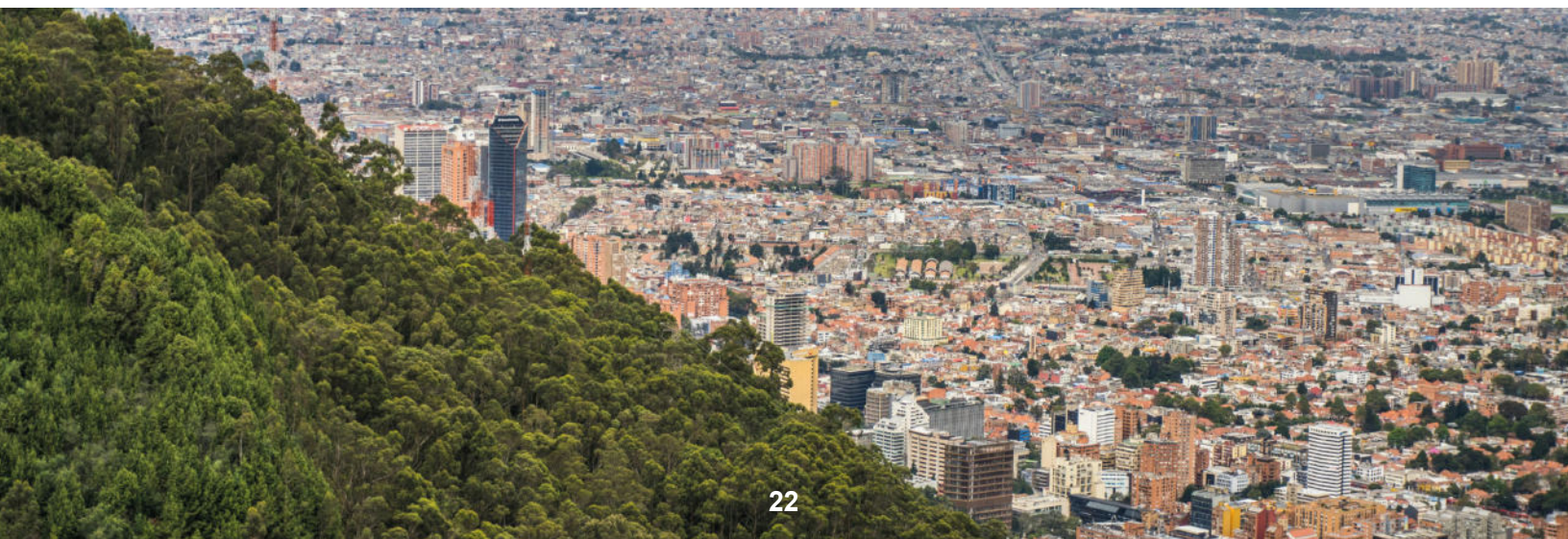
Por su parte, el mayor número de intervenciones se encuentran en la región Andina, área que representa el 21 % de la superficie total reportada. En el caso de Amazonía, la mayor parte de los reportes corresponden a estrategias de sistemas agroforestales, cercas vivas y manejo forestal sostenible (no incluidas en este análisis), mientras que las áreas con procesos de restauración del bosque representan menos del 1 % de la superficie recopilada para todo el país (figura 8).

Figura 8

Número de áreas y superficie (ha) en proceso de restauración del bosque reportadas entre 2007 y 2022 por región natural

Cantidad de áreas reportadas		Región natural	Superficie de las áreas reportadas	
%	n.º		(ha)	%
4,2	157	Pacífico	545	0,2
10,8	400	Orinoquía	180.661	69,5
29,1	1,083	Caribe	20.900	8,0
52,2	1,940	Andina	55.553	21,4
3,7	139	Amazonía	2.190	0,8

Cerros Orientales, Bogotá





Portales del Fragüita, Caquetá

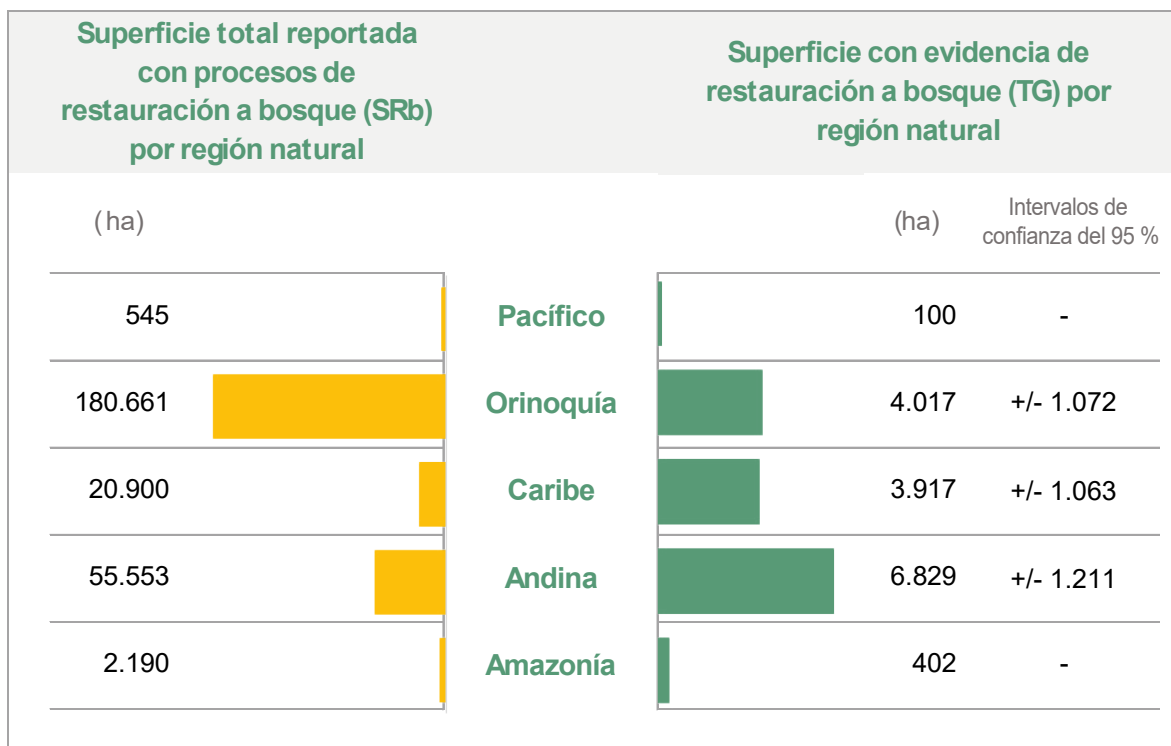
Superficie (ha) con evidencia de restauración a bosque por región natural

De acuerdo con los resultados del monitoreo de la línea base histórica, la extensión de los reportes no coincide necesariamente con la superficie de ganancia de las coberturas de interés observada en las imágenes de satélite. Si bien para la región de la Orinoquía se recopiló una extensión considerable de áreas, fue en la región Andina donde se detectó la mayor superficie con evidencia de restauración del bosque. En la región Caribe, por su parte, se registró una superficie restaurada similar a la de la

Orinoquía a pesar de que el área recopilada es notoriamente inferior. En el caso de la Amazonía, los valores bajos respecto a otras regiones se deben a que la mayor parte de las intervenciones contemplan otras estrategias distintas a la restauración del bosque. Finalmente, para la región Pacífica se encontró un bajo reporte de áreas con iniciativas de restauración (figura 9).

Figura 9

Superficie total reportada con procesos de restauración potencial a bosque por región natural vs. la superficie con evidencia de restauración en las imágenes de satélite (ganancia de cobertura de bosque o vegetación leñosa) para cada región natural





**ANEXO:
FICHA METODOLÓGICA DEL
REPORTE DEL MONITOREO DE
LA RESTAURACIÓN DEL
BOSQUE CON SENSORES
REMOTOS A NIVEL NACIONAL**

VI.0

2007-2022

LÍNEA BASE HISTÓRICA



Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete

OBJETIVO / PERTINENCIA

Realizar el monitoreo con sensores remotos de las áreas reportadas con procesos de restauración y generar reportes nacionales y subnacionales acerca de la extensión (superficie) de la restauración del bosque en Colombia, de manera articulada con la información del SMByC del Ideam. Esta información apoyará el seguimiento de la efectividad y la persistencia de las acciones implementadas y permitirá complementar los reportes de los compromisos globales frente al cambio climático.

PERIODO DE REFERENCIA / COBERTURA TEMPORAL

Línea base histórica: 2007-2014, 2015-2018, 2019-2022.

COBERTURA Y DESAGREGACIÓN GEOGRÁFICA

El monitoreo de la restauración del bosque para la línea base 2007-2022 se realizó en las áreas con procesos de restauración que potencialmente podrían llevar a la ganancia de coberturas de bosque según la información disponible reportada por entidades públicas y privadas en el territorio continental e insular del país y recopilada para el análisis. Los resultados del reporte se presentan desagregados geográficamente en dos niveles:

Nacional: corresponde a la extensión continental e insular del territorio colombiano, de acuerdo con los límites oficiales establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Regiones naturales: corresponde a las cinco regiones naturales (Amazonía, Orinoquía, Andina, Pacífica y Caribe) definidas para los reportes de la superficie de bosque y del cambio de superficie de esta cobertura por el SMByC del Ideam.

METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología del *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques mediante el uso de sensores remotos, aplicable a otras coberturas forestales*, desarrollado por el Ideam y GGGI (Vergara et al., 2023).

Fuente de datos e insumos

Áreas reportadas con procesos de restauración

Se utilizaron los registros disponibles de las siguientes fuentes:

Plataforma / entidad	Porcentaje de los registros (áreas o polígonos recopilados)
Aplicativo de Proyectos de Restauración de Minambiente ⁵	22 %
Aplicativo Ágil de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) ⁶	40 %
Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)	24 %
Parques Nacionales Naturales	13 %
IIAP	1 %

En el análisis se incluyeron las áreas reportadas con estrategias de restauración que potencialmente podrían llevar a la recuperación del bosque: restauración pasiva (natural o espontánea), restauración activa o asistida, plantaciones forestales protectoras, revegetalización (con evidencia de siembra de especies de bosque en la base de datos o en las imágenes) y reforestación. Se excluyen las actividades de remediación, cercas vivas, barreras rompevientos, sistemas agroforestales y silvopastoriles, estrategias que no tienen por objeto el establecimiento de coberturas de bosque de acuerdo con la definición adoptada por el país.

Así mismo, las áreas reportadas con estrategias de manejo forestal sostenible y herramientas del paisaje incluyen la implementación de diversas actividades, incluido el aprovechamiento del bosque, por lo que no se monitorean para este reporte. Las estrategias asociadas a otras coberturas forestales distintas al bosque natural se incluirán en los siguientes informes.

Datos de sensores remotos

Las imágenes de reflectancia de la superficie de los sensores Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, 9 OLI-2), con un nivel de procesamiento L1T suministradas por el USGS,

constituyen el principal insumo para el monitoreo de la restauración del bosque a nivel nacional. Se utilizaron los datos con fecha de toma entre el inicio (1 de enero de 2007) y el final del periodo de análisis de la serie de tiempo (31 de diciembre de 2022).

Adicionalmente, para el ajuste de los mapas y, posteriormente, para la evaluación de los resultados y estimación de las áreas, se incorporaron las imágenes satelitales de otros programas que cuentan con una mayor resolución espacial: Sentinel 2A (desde 2015), Planet Scope (desde 2016), Maxar/Digital Global y el repositorio disponible en la aplicación de Google Earth.

Universo de estudio

Áreas reportadas con actividades de restauración del bosque que se encuentran en el territorio continental e insular colombiano, con una superficie igual o superior a 1 ha o entre 0,5 ha y 1 ha, que tengan continuidad con otras áreas en restauración o superficies de bosque existentes. Este universo de estudio es variable en la medida en que se incorporan nuevas áreas de proyectos de restauración para cada nuevo periodo de análisis (históricas o futuras).

⁵ <https://cargue-informacion-restauracion-mads.hub.arcgis.com/>

⁶ <https://sig.anla.gov.co/seleccion.aspx>

Metodología para generar el reporte

La metodología para el monitoreo y el reporte de la restauración del bosque se realizó en las tres etapas descritas a continuación.

Recopilación y estructuración de la base de datos de las áreas reportadas con procesos de restauración

Las áreas reportadas con procesos de restauración del periodo de análisis fueron recopiladas, revisadas y almacenadas en una base de datos geográfica, de acuerdo con los lineamientos definidos en el protocolo de monitoreo de la restauración del bosque (Vergara et al., 2023). Se corrigió la duplicidad de registros y los errores topológicos o de posición geográfica y coherencia, filtrando posteriormente las áreas con estrategias que potencialmente pueden llevar a la restauración del bosque.

Elaboración del mapa de restauración del bosque a partir de datos de sensores remotos

Para la serie histórica 2007-2022 se implementaron métodos de análisis de series de tiempo (principalmente, LandTrendr), utilizando el índice NBR (Normalized Burn Ratio) derivado de las bandas de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio de onda corta (SWIR1) de las imágenes Landsat (reflectancia de la superficie), índice con el que se obtuvieron mejores resultados respecto a otros probados. La serie de tiempo se construyó con una ventana de seis años previos al periodo de análisis (2001-2022).

Con esta metodología se elaboró un mapa pared a pared (“wall to wall”) cuya unidad de observación corresponde a cada uno de los píxeles de 30 x 30 m derivados de las imágenes de satélite del programa Landsat y que se encuentran incluidos dentro de las áreas reportadas con procesos de restauración del bosque. De cada unidad se obtuvo la información espectral para calcular el índice NBR y, mediante el análisis de series de tiempo, se detectaron las ganancias de cobertura de bosque o vegetación leñosa. Las clases asignadas al mapa fueron:

- Sin ganancia (SG).
- Ganancia de vegetación leñosa (GVL).
- Ganancia de bosque (GB).

Los resultados fueron revisados y ajustados con el apoyo de imágenes de mayor resolución para los años disponibles (Sentinel 2A, Planet Scope, Maxar/Digital Globe y el repositorio Google Earth).

Muestreo para la evaluación de exactitud temática y estimación de áreas

En esta fase se utilizó un diseño de muestreo sistemático de distancia variable, con muestras ubicadas en las áreas de restauración del bosque de la base de datos recopilada. Se estimó el tamaño de muestra mínimo utilizando la fórmula de Cochran (1977, citado en Olofsson, 2021):

$$n = \frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{\hat{V}(\hat{p})} \Rightarrow \hat{V}(\hat{p}) = \left(\frac{ME \times \hat{p}}{Z} \right)^2$$

Donde,

\hat{p} : exactitud global del mapa objetivo o anticipada (es desconocida; por lo tanto, se debe asignar de manera preliminar), expresada como un valor entre 0 y 1.

$\hat{V}(\hat{p})$: varianza deseada de la estimación.

ME: margen de error (p. e.: 0,05 para el 5 %).

Z: valor de la distribución normal estándar de acuerdo nivel de confianza deseado (p. e.: 1,96 para un intervalo del 95 % de confianza).

Cumpliendo con los criterios de tamaño mínimo, se implementó un muestreo sistemático de 2.595 unidades. La unidad de muestreo con la que se construyó la clasificación de referencia corresponde a cada uno de los píxeles de 30 x 30 m del mapa en el que se ubica un punto del muestreo.

Cada unidad de la muestra fue clasificada utilizando las imágenes de satélite disponibles: imágenes Landsat utilizadas para el análisis de la serie de tiempo, Planet Scope (desde 2016), Sentinel 2 (desde 2015), Maxar/Digital Globe y Google Earth. Las etiquetas de la clasificación corresponden a las clases del mapa: sin ganancia (SG), ganancia de vegetación leñosa (GVL) y ganancia de bosque (GB). La muestra se clasificó para tres periodos: 2007-2014, 2015-2018, 2019-2022.

Para el análisis se construyó una matriz de error como una tabulación cruzada de las clases del mapa versus las etiquetas asignadas a las muestras de la clasificación de referencia. En la diagonal de la matriz se ubica el número de muestras en las que las etiquetas del mapa y la clasificación de referencia coinciden, mientras que los elementos por encima o por debajo corresponden a errores de omisión o de comisión.

		Clasificación de referencia				
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	...Clase j	Total
Mapa	Clase 1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	... n_{1j}	n_{1+}
	Clase 2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	... n_{2j}	n_{2+}
	Clase 3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	... n_{3j}	n_{3+}
	...Clase i	... n_{i1}	... n_{i2}	... n_{i3}	... n_{ij}	n_{i+}
	Total	n_{+1}	n_{+2}	n_{+3}	n_{+j}	n

Cada uno de los valores de n_{ij} de la matriz se transformaron en proporciones de área (\hat{p}_{ij}), utilizando la siguiente ecuación (Olofsson et al., 2013; 2014):

$$\hat{p}_{ij} = w_i * \left(\frac{n_{ij}}{n_{i+}} \right)$$

Donde,

\hat{p}_{ij} : proporción de área de la clase i del mapa, clasificada como clase j en los datos de referencia.

n_{ij} : número de muestras de la clase i del mapa clasificada en los datos de referencia (muestra) como clase j (celda ij de la matriz).

n_{i+} : Suma total del número de muestras de la clase i del mapa en la matriz.

w_i : Proporción del área del mapa ocupada por la clase i .

Los estimadores de la exactitud global, usuario y productor se calcularon de acuerdo con Olofsson et al. (2013, 2014), FAO (2016) y Stehman y Foody (2019). El estimador de la exactitud global (O), definido como el grado en el cual el mapa producido concuerda con una clasificación de referencia, se calcula a partir de la matriz de error con los valores de proporciones de área (p_{jj}):

$$O = \sum p_{jj}$$

Donde,

p_{jj} : proporción de área de la clase j en la que hay coincidencia entre la clase asignada a la muestra de referencia y la clase del mapa, es decir, cada uno de los valores que se encuentran en la diagonal de la matriz.

Por otra parte, la exactitud de usuario de la clase i (U_i) es

la proporción de área de la muestra que pertenece a la clase i del mapa, identificada en la misma clase en los datos de referencia, y está asociada a los errores de comisión. La exactitud de productor de la clase j (P_j), entretanto, es la proporción de área de la muestra identificada como clase j en los datos de referencia que pertenece a la misma clase en el mapa, y está asociada a los errores de omisión (Olofsson et al., 2013). Estos parámetros se calculan mediante:

$$U_i = \frac{p_{ii}}{p_{i+}} \quad P_j = \frac{p_{jj}}{p_{+j}}$$

Donde,

p_{i+} : proporción de la superficie total cartografiada en la clase i obtenida de las filas de la matriz.

p_{+j} : proporción de la superficie total de la clase i en los datos de referencia, obtenida de las columnas de la matriz.

Finalmente, para estimar las áreas que se incluyen en el reporte se utilizan los estimadores de la media $\hat{\mu}$ y la varianza \hat{V} aplicables a los muestreos sistemáticos (Olofsson, 2018; GFOI, 2020):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \hat{V} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu})^2}{n(n-1)}$$

Donde,

i : cada una de las unidades de la muestra (n).

y_i : la i -ésima observación de la muestra de referencia.

El resultado de $\hat{\mu}$ se transformó en unidades de área a partir del resultado del mapa, y se calculó el intervalo de confianza del 95 % como medida de la incertidumbre del área estimada.

Estimación de la proporción de áreas por periodos de tiempo o regiones geográficas

Si bien los algoritmos permitieron detectar las ganancias de las coberturas de interés para la serie histórica 2007-2022, no siempre se identificó un vértice o corte que segmentara la serie para determinar la fecha de inicio del proceso. En este caso se utilizó la muestra de referencia para estimar la proporción de superficie restaurada que tuvo lugar en cada periodo de análisis de la serie histórica (2007-2014, 2015-2018, 2019-2022), asignando a cada muestra el año en el que se evidencia el inicio del crecimiento de la vegetación. Con esta tipificación se calcularon las proporciones, estimaciones de área y error estándar para cada periodo, de acuerdo con Molinario et al. (2020).

Así, la proporción de área y la estimación del área para cada periodo (t) se obtuvieron con:

$$p_t = \frac{n_t}{n} \Rightarrow A_t = A_{tot} \times p_t$$

Donde,

p_t : Proporción de la muestra en la clase de interés (en este caso, ganancia de bosque o vegetación leñosa para el periodo t).

n_t : Número de muestras clasificadas en la clase de interés (en este caso, de ganancia de bosque vegetación leñosa para el periodo t).

n : Número total de muestras.

A_{tot} : Área total del mapa.

El error estándar del área estimada para la clase de interés (en este caso, ganancia de bosque o vegetación leñosa en el periodo t) se calculó mediante:

$$SE(A_t) = A_{tot} \times \sqrt{\frac{p_t(1-p_t)}{(n-1)}}$$

Luego, a partir del área estimada y el error estándar, se construyó el intervalo de confianza del 95 % como medida de la incertidumbre para reportar los datos de superficie cada periodo. El mismo proceso se utilizó para hallar las áreas desagregadas por región natural.

Indicadores o estadísticas del reporte

Superficie (ha) reportada en proceso de restauración del bosque (SRb)

El primer indicador del reporte corresponde a la superficie total (ha) reportada con procesos de restauración potencial a bosque acumuladas durante el periodo de análisis ($t-n,t$), es decir, 2007-2022, recopiladas, ajustadas y filtradas de acuerdo con los lineamientos establecidos en el *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques mediante el uso de sensores remotos aplicable a otras coberturas forestales* (Vergara et al., 2023).

El indicador se calcula con:

$$SRB_{(t-n,t)} = \sum_{t-n}^t arb$$

Donde,

$SRB_{(t-n,t)}$: superficie total reportada y recopilada en hectáreas con procesos de restauración potencial a bosque acumulada para el periodo de análisis ($t-n,t$).

arb : superficie en hectáreas de cada una de las áreas (polígonos) con procesos de restauración potencial a bosque reportadas y recopiladas para el periodo de análisis ($t-n,t$).

Superficie (ha) con evidencia de restauración a bosque (TG)

Un segundo indicador del reporte corresponde a la superficie (ha) con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) acumulada en el periodo de análisis ($t-n,t$), esto es, 2007-2002. Esta variable tiene lugar dentro de la superficie reportada en proceso de restauración potencial del bosque ($SRB_{(t-n,t)}$):

$$TG_{(t-n,t)} = PG_{(t-1,t)} +$$

Donde,

$PG_{(t-1,t)}$: superficie (ha) con evidencia en la persistencia de la restauración, es decir, la superficie con ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) acumulada hasta el periodo anterior ($t-1$), que permanece en el periodo (t). En el caso particular de la línea base, incluye las ganancias detectadas entre 2007 y 2022 que persisten hasta el año 2022.

$G_{(t)}$: superficie (ha) con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) detectada en el periodo de análisis (t). Para este reporte, por ser una línea base, el valor es igual a cero.

BIBLIOGRAFÍA

- Bey, A., Sánchez-Paus, A., Maniatis, D., Marchi, G., Mollicone, D., Ricci, S., Bastin, J. F., Moore, R., Federici, S., Rezende, M., Patriarca, C., Turia, R., Gamoga, G., Abe, H., Kaidong, E. y Miceli, G. (2016). Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation. *Remote Sensing*, 8(10), 807. <https://doi.org/10.3390/rs8100807>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. y Maginnis, S. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. IUCN.
- Decuyper, M., Chávez, R. O., Lohbeck, M., Lastra, J. A., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M. y Vågen, T. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sensing of Environment*, 269(12), 112829. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>
- DNP. (2020). *Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques (documento Conpes 4021)*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4021.pdf>
- DNP. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia potencia mundial de la vida*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-acional-de-Finversiones-2022-2026.pdf>
- FAO. (2016). Map accuracy assessment and area estimation: A Practical Guide. National forest monitoring assessment (Working Paper 46).
- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K. y Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. V 2.0. Ideam.
- Gann, F., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C. Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K. y Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- GFOI. (2020). *Integration of remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests* (3.a ed.). <https://www.reddcompass.org/mgd/resources/GFOI-MGD-3.1-en.pdf>
- Gobierno de Colombia. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>
- Ideam. (2019). *Documento Metodológico: Operación Estadística Monitoreo de la Superficie de Bosque Natural en Colombia*. Ideam. http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72065174/Doc_metodol%C3%B3gico_SMBYC_Consolidado_v12_26062019.pdf
- McKenna, P. B., Lechner, A. M., Hernandez Santin, L., Phinn, S. y Erskine, P. D. (2023). Measuring and monitoring restored ecosystems: can remote sensing be applied to the ecological recovery wheel to inform restoration success? *Restoration Ecology*, 31(1), e13724. <https://doi.org/10.1111/rec.13724>

- Minambiente. (2015). *Plan Nacional de Restauración: Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Disturbadas*.
https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACION_2.pdf
- Molinario, G., Hansen, M., Potapov, P., Tyukavina, A. y Stehman, S. (2020). Contextualizing Landscape-Scale Forest Cover Loss in the Democratic Republic of Congo (DRC) between 2000 and 2015. *Land*, 9(1), 23.
<https://doi.org/10.3390/land9010023>
- Olofsson, P. (2018). Accuracy and Area Estimation. En S. Liang (Ed.), *Comprehensive Remote Sensing* (vol. 6, pp. 128-135). Elsevier.
- Olofsson, P. (2021). Simple random / systematic sampling. Open MRV. Banco Mundial, Forest Carbon Partnership y GFOI. https://openmrv.org/es/w/modules/mrv/modules_3/simple-random-systematic-sampling
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V. y Woodcock, C. E. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.031>
- Olofsson, P., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- ONU. (2019, 1 de marzo). Asamblea General. 69ª Sesión Plenaria. Resolución 73/284: Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración. A/RES/73/284.
- Sacande, M., Martucci, A. y Vollrath, A. (2021). Monitoring Large-Scale Restoration Interventions from Land Preparation to Biomass Growth in the Sahel. *Remote Sensing*, 13(18), 3767. <https://doi.org/10.3390/rs13183767>
- Stehman, S. y Foody, G. M. (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111199. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>
- Strahler, A. H., Boschetti, L., Foody, G. M., Friedl, M. A., Hansen, M. C., Herold, M., Mayaux, P., Morissette, J. T., Stehman, S. V. y Woodcock, C. E. (2006). *Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps (GOF-C-GOLD Report N.o 25)*. Unión Europea.
- Vergara, L. K., Galindo, G., Ruiz, A. y Valbuena, C. A. (2023). *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques mediante el uso de sensores remotos aplicable a otras coberturas forestales. Nivel Nacional. Versión 1. 0*. Ideam, GGGI.



Con el apoyo de:



Embajada de Noruega



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura