

PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DE BOSQUES MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS APLICABLE A OTRAS COBERTURAS FORESTALES

V1.0

NIVEL NACIONAL

PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DE
BOSQUES MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS
APLICABLE A OTRAS COBERTURAS FORESTALES

V1.0

NIVEL NACIONAL

GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO
Presidente de Colombia

FRANCIA MÁRQUEZ MINA
Vicepresidenta de Colombia

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

SANDRA YOLIMA SGUERRA CASTAÑEDA
Viceministra (e) de Políticas y Normalización Ambiental

FRANCISCO JAVIER CANAL ALBÁN
Viceministro 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

SEBASTIÁN CAMILO CARRANZA TOVAR
Director de Cambio Climático y Gestión del Riesgo

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 Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

CÉSAR AUGUSTO SÁNCHEZ WALDRON
Jefe de Oficina Asesora de Planeación

JUAN DAVID GARCÍA CASTAÑO
Jefe de Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ
Jefe de Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe de Oficina de Control Interno

ALEXIS TIGREROS
Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

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 del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono - SMBByC

Instituto Global para el Crecimiento Verde - GGGI

PABLO MARTÍNEZ
Representante de país en Colombia

IVÁN DARÍO VALENCIA
Oficial principal y coordinador de Políticas del programa de Colombia

Autores

LINA KATERINE VERGARA CHAPARRO
GUSTAVO GALINDO GARCÍA
ALEJANDRA RUÍZ DÍAZ
CÉSAR AUGUSTO VALBUENA CALDERÓN

Coordinación editorial

Instituto Global para el Crecimiento Verde - GGGI

FRANK RIJSBERMAN
Director General

HELENA MCLEOD
Directora General Adjunta

PABLO MARTÍNEZ
Representante de país en Colombia

IVÁN DARÍO VALENCIA
Oficial principal y coordinador de políticas del programa de Colombia

ALEJANDRA RUÍZ
Asociada sénior REDD+

NATALY VARGAS
Asistente de Comunicaciones

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

ANDRÉS FELIPE TAPIERO RÍOS
Coordinación editorial

Producción editorial

Puntoaparte Editores
www.puntoaparte.com.co

ANDRÉS BARRAGÁN MONTAÑA
Director Editorial

MATEO L. ZÚÑIGA
JERSON SIABATTO MORENO
Directores de Arte

JHON GÜECHÁ
Corrección de estilo

GGGI
www.shutterstock.com
Crédito de fotografías de portada

Esta publicación es posible gracias al apoyo de la Embajada de Noruega

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 en REDD+ y Manejo Forestal Sostenible - Programa ONU-REDD

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

ISBN
978-958-5489-26-4

Cítese como: 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*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Instituto Global de Crecimiento Verde (GGGI).

Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Diciembre de 2023, Bogotá, D. C., Colombia

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

INTRODUCCIÓN

Pág 10.

1



OBJETIVOS, ALCANCES Y CONTEXTO DEL PROTOCOLO

Pág 13.

OBJETIVO

Pág 14.

ALCANCES Y CONSIDERACIONES DEL PROTOCOLO

Pág 15.

CONTEXTO DE LA RESTAURACIÓN EN EL MARCO GLOBAL, POLÍTICO, NORMATIVO E INSTITUCIONAL

Pág 19.

2



MARCO TEÓRICO Y DEFINICIONES ADOPTADAS PARA EL PROTOCOLO

Pág 28.

MARCO TEÓRICO

Pág 29.

DEFINICIONES ADOPTADAS PARA EL DISEÑO DEL PROTOCOLO

Pág 52.

3



METODOLOGÍA

Pág 56.

DISEÑO METODOLÓGICO

Pág 57.

CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL REPORTE DE LAS ÁREAS CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN

Pág 105.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pág 112.

ANEXOS

Pág 118.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema general del protocolo de procesamiento digital de imágenes diseñado e implementado por el SMyC para generar las cifras anuales de superficie y cambio de la superficie de bosque	Pág 24.
Figura 2	Esquema del conjunto de actividades de restauración propuestas por SER adaptadas por la ONU para la Década de la Restauración de los Ecosistemas	Pág 30.
Figura 3	Descripción gráfica de una serie de tiempo de datos provenientes de sensores remotos utilizando un índice de vegetación	Pág 43.
Figura 4	Estrategias definidas en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF para cada uno de los tres enfoques incluidos en el PNR	Pág 54.
Figura 5	Etapas de la implementación del protocolo de monitoreo de las áreas con procesos de restauración potencial del bosque	Pág 60.
Figura 6	Pasos mínimos para la revisión y el ajuste de la información que se incorpora en la base de datos geográfica de las áreas con procesos de restauración	Pág 63.
Figura 7	Ejemplos de errores topológicos en los polígonos recopilados que se recomienda revisar antes de incluirlos en la base de datos para el monitoreo	Pág 65.
Figura 8	Ejemplos de los criterios aplicados para filtrar las áreas con procesos de restauración, reportadas y recopiladas para el análisis	Pág 71.
Figura 9	Disponibilidad de datos de sensores remotos operativos actualmente para el análisis de series de tiempo	Pág 76.
Figura 10	Ejemplo de pérdidas y ganancias de vegetación leñosa/bosque observadas entre 2007 y 2022 en un área reportada con procesos de restauración	Pág 77.
Figura 11	Preprocesamiento de las imágenes de satélite Landsat como insumo para el análisis de series de tiempo	Pág 78.

NIVEL NACIONAL

Figura 12	Esquema de la metodología para el monitoreo de la restauración del bosque de la línea base y del seguimiento anual	Pág 80.
Figura 13	Número de observaciones disponibles anualmente para el análisis de series de tiempo, provenientes de las imágenes de los sensores del programa satelital Landsat	Pág 82.
Figura 14	Trayectorias de las series de tiempo para un píxel de un área deforestada utilizando los algoritmos CCDC y LandTrendr	Pág 83.
Figura 15	Trayectorias de las series de tiempo para un píxel de un área con bosque restaurado utilizando los algoritmos CCDC y LandTrendr	Pág 84.
Figura 16	Detección de cambios utilizando análisis de series de tiempo con el algoritmo LandTrendr	Pág 85.
Figura 17	Aplicación ThRasE para QGIS, creada por el SMByC para la revisión y edición de mapas temáticos en formato <i>raster</i> , recomendada para el ajuste de los resultados obtenidos con el análisis de la serie de tiempo	Pág 90.
Figura 18	Funcionalidades de la aplicación AcaTaMa en QGIS, diseñada por el SMByC para la evaluación de exactitud temática y los estimadores de área, que permite desarrollar las tres etapas del proceso: diseño de muestreo, diseño de respuesta y análisis	Pág 92.
Figura 19	Opciones del muestreo sistemático en la aplicación AcATaMa para QGIS	Pág 94.
Figura 20	Ventana de clasificación de las unidades del muestreo en AcATaMa para QGIS utilizando las imágenes de satélite disponibles para el periodo de análisis	Pág 97.
Figura 21	Metodología para asignar la etiqueta o clase a las unidades de observación, en los casos en que se presenta desacuerdo entre las clases asignadas por los distintos intérpretes	Pág 98.
Figura 22	Ejemplo de un área reportada mayor al área implementada (posiblemente se reportó el límite del predio)	Pág 108.
Figura 23	Ejemplo de áreas con procesos de restauración en las que los datos de sensores remotos sugieren que el área intervenida es mayor a la reportada	Pág 108.
Figura 24	Áreas reportadas con estrategia de revegetalización, que, de acuerdo con la cobertura observada en las imágenes y las especies utilizadas correspondería a una restauración activa o asistida	Pág 109.
Figura 25	Ejemplo de un área en la que la fecha de implementación reportadas (2021) no coincide con lo observado en las imágenes	Pág 109.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Niveles geográficos del monitoreo de la restauración, objetivos y ejemplos de indicadores y herramientas aplicables a cada uno	Pág 37.
Tabla 2	Características de las principales imágenes de satélite ópticas y SAR de mediana y alta resolución disponibles en la actualidad para realizar análisis de series de tiempo	Pág 45.
Tabla 3	Principales características de los algoritmos de segmentación de series de tiempo más utilizados (LandTrendr, CCDC y BFAST Monitor) y que se pueden implementar en la detección de la ganancia de coberturas asociadas a la restauración forestal	Pág 48.
Tabla 4	Fuentes de información para recopilar las áreas con procesos de restauración	Pág 62.
Tabla 5	Etiquetas utilizadas para clasificar las unidades de observación del muestreo en la evaluación de exactitud temática y la estimación de áreas ajustadas	Pág 96.
Tabla 6	Definiciones recopiladas para de las estrategias incluidas en el aplicativo de restauración (Minambiente) y el SNIF (Ideam)	Pág 118.
Tabla 7	Atributos y dominios incluidos en la base de datos espacial recopilada para el monitoreo de la restauración del bosque	Pág 121.

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ABTs	Objetivos de biodiversidad de Aichi
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
CDB	Convención Marco de Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica
CNULD	Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación
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
FERM	Marco para el monitoreo de la restauración de ecosistemas
GEI	Gases de efecto invernadero
GGGI	Instituto Global de Crecimiento Verde (Global Green Growth Institute)
Gt	Gigatoneladas
IAvH	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IFN	Inventario Forestal Nacional
IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann”
Invemar	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”
IPBES	Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático

NIVEL NACIONAL

IUCN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
Minambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Minagricultura	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
MRV	Mecanismos de monitoreo, reporte y verificación
NAMAs	Acciones nacionalmente apropiadas de mitigación
NDC	Contribución determinada a nivel nacional
NIR	Infrarrojo cercano
NREF	Niveles de referencia de las emisiones forestales
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNGIBSE	Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PNR	Plan nacional de restauración, recuperación y rehabilitación de ecosistemas degradados
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RBP	Restauración de bosques y paisajes
REDD+	Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques
SER	Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica
SIAC	Sistema de Información Ambiental para Colombia
SMBYC	Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono
SNIF	Sistema Nacional de Información Forestal
STAPER	Plan de acción a corto plazo para la restauración de ecosistemas
SWIR	Infrarrojo de onda corta
TIR	Infrarrojo térmico
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza

INTRODUCCIÓN

La restauración de los ecosistemas, incluidos los bosques y paisajes, es una de las estrategias claves para afrontar los retos en la lucha contra el cambio climático, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos para la naturaleza y la sociedad. Esta se integra en las iniciativas y desafíos globales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los mecanismos de reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+), las metas Aichi, el desafío de Bonn y la Iniciativa 20x20, entre otras (Buckingham *et al.*, 2019; Ramírez y Morales, 2021; Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [IUCN], 2020). En marzo de 2019 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 incrementar los esfuerzos para prevenir, detener y revertir la degradación de ecosistemas y crear conciencia sobre la importancia de lograr una restauración exitosa (ONU, 2019).

En el contexto nacional, Colombia establece el *Plan nacional de restauración, rehabilitación y recuperación de ecosistemas degradados* (PNR) en 2015, un plan de acción a 20 años para orientar y promover la restauración ecológica, la recupera-

ción y la rehabilitación de áreas disturbadas en un marco amplio de conservación de la biodiversidad y de adaptación a los cambios globales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente], 2015). Así mismo, las acciones de restauración se incluyen como parte de las políticas nacionales de biodiversidad y servicios ecosistémicos (Minambiente, 2012), cambio climático (Minambiente, 2016) y la lucha contra la deforestación y gestión de los bosques (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2020). De esta forma, el país se ha propuesto metas ambiciosas para incrementar las áreas con procesos de restauración en los Planes Nacionales de Desarrollo de los últimos cuatrienios y como parte del portafolio del reporte actualizado de la contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Colombia, presentado a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Gobierno de Colombia, 2020). Consecuente con esta visión, Minambiente, los institutos de investigación adscritos y demás entidades del sector ambiental, la academia, los actores públicos y privados y las comunidades vienen desarrollando acciones para fortalecer las estrategias, incrementar el conocimiento científico sobre los procesos de restauración, identificar las mejores prácticas para su implementación e instaurar acciones e iniciativas a lo largo del territorio.

NIVEL NACIONAL



Fotografía: Río Amazonas / Curioso.Photography / www.shutterstock.com

Sumado a los beneficios sobre la biodiversidad, la estructura, la función y el incremento de los servicios ecosistémicos, los procesos de restauración de los bosques y de otras coberturas arbóreas aportan a las acciones de mitigación frente al cambio climático y a la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero, gracias al incremento en los contenidos de carbono derivados de la captura y el almacenamiento que tiene lugar durante el crecimiento y la regeneración de la vegetación y el ecosistema (Chazdon *et al.*, 2016; Griscom *et al.*, 2017; Lefebvre *et al.*, 2021; Lewis *et al.*, 2019; Schwartz *et al.*, 2020). Por lo tanto, el seguimiento a corto, mediano y largo plazo de las áreas de

restauración de los bosques permite articular y complementar la información de los reportes de la superficie del bosque y de los cambios requeridos en esta para el cumplimiento de los compromisos globales frente al cambio climático, siendo altamente recomendable para los países integrarlas a los sistemas nacionales de monitoreo forestal, reduciendo la duplicidad de esfuerzos y favoreciendo la sostenibilidad, la coherencia y la transparencia de la información reportada (Ramírez y Morales, 2021).

En Colombia, el seguimiento oficial de la superficie de bosque y de los cambios de esta cobertura así como los mecanismos de monitoreo, reporte

NIVEL NACIONAL

y verificación (MRV) de mitigación de cambio climático asociados son realizados por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (Decreto 1655 de 2017; Ley 2169 de 2021). Es así como en 2020, el Ideam, con el apoyo del Instituto Global de Crecimiento Verde (GGGI), da inicio al diseño de un módulo de monitoreo de la restauración integrado con el SMBYC, el Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) y el Inventario Forestal Nacional (IFN), de acuerdo con las directrices establecidas en la *Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques* (Conpes 4021 de 2020). Como parte de las actividades se estructuró el *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques¹ mediante el uso de sensores remotos, aplicable a otras coberturas forestales*, para ser implementado a nivel nacional y subnacional. La metodología propuesta hace uso de las ventajas que ofrece la teledetección para llevar a cabo un monitoreo espacialmente coherente para áreas extensas, en tiempos relativamente cortos y con menores costos, generando 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 (Bey *et al.*, 2016; Decuyper *et al.*, 2022; McKenna *et al.*, 2023; Sacande *et al.*, 2021). Esta metodología se articula con los lineamientos y procesos del SMBYC para el monitoreo de las superficies y cambios de la superficie del bosque, realizados por el Ideam desde hace más de una década.

El protocolo tiene por objeto establecer los lineamientos metodológicos para el monitoreo con sensores remotos de la extensión (superficie) de la restauración del bosque en Colombia, para generar los reportes nacionales, subnacionales y de los compromisos globales frente al cambio climático, de manera articulada con los datos del SMBYC. Si bien el protocolo fue diseñado y probado para detectar la ganancia de bosques, puede

aplicarse a otras coberturas arbóreas o forestales, teniendo en cuenta que los principios de la detección son similares.

En la primera parte se establecen los alcances y las consideraciones básicas que los usuarios deben tener en cuenta para la implementación de la metodología y para el uso de los datos derivados. Además, incluye el marco de referencia internacional respecto a las iniciativas y metas globales, junto al marco de políticas, planes, metas y estrategias nacionales, y las herramientas y fuentes de información disponibles para la restauración y el monitoreo del bosque.

La segunda sección incluye el marco teórico que guía el diseño del protocolo respecto a la restauración, los insumos disponibles, los retos y las consideraciones para tener en cuenta en el seguimiento de los cambios graduales que tienen lugar durante los procesos de restauración y los métodos que resultarían adecuados.

En la tercera parte se presenta la metodología propuesta para el monitoreo, dividida en 4 etapas: 1) la recopilación, estructuración, filtro y ajuste de la información de las áreas reportadas con procesos de restauración; 2) la metodología de procesamiento de las imágenes para construir el mapa de restauración; 3) la evaluación de la exactitud temática y estimación de las áreas a partir de muestreos estadísticos, siguiendo las directrices y recomendaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para el reporte de las emisiones asociadas al bosque y 4) el reporte de los resultados e indicadores propuestos.

En el último apartado se muestran algunas consideraciones y recomendaciones a partir de las consultas realizadas con las entidades del sector y las pruebas realizadas para el diseño del protocolo, especialmente en la recopilación, estandarización y flujo de información de las áreas reportadas con procesos de restauración.

1. De acuerdo con la definición de bosque natural adoptado por Colombia para los reportes de los compromisos globales, pero aplicable a otras coberturas forestales y arbóreas.



OBJETIVOS, ALCANCES Y CONTEXTO DEL PROTOCOLO

OBJETIVO

Pág 14.

ALCANCES Y CONSIDERACIONES DEL PROTOCOLO

Pág 15.

**CONTEXTO DE LA RESTAURACIÓN EN EL MARCO GLOBAL,
POLÍTICO, NORMATIVO E INSTITUCIONAL**

Pág 19.

OBJETIVO

Establecer los lineamientos metodológicos para el monitoreo con sensores remotos y la elaboración de los reportes nacionales y sub-nacionales acerca de la extensión (superficie) de la restauración del bosque en Colombia, de manera articulada con la información generada por el SMByC (Ideam). El monitoreo propuesto 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.



ALCANCES Y CONSIDERACIONES DEL PROTOCOLO

Para aplicar el protocolo y analizar los datos derivados de su implementación es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:



1

El protocolo está diseñado para monitorear el avance de los procesos de restauración del bosque reportados e implementados en Colombia y la persistencia de los resultados, como soporte al seguimiento de las metas propuestas. Así mismo, busca mejorar el reporte de los datos de actividad (área) frente a los compromisos globales para la reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+) y las medidas de mitigación² al cambio climático.



2

El protocolo se diseñó como una herramienta metodológica para consolidar una fuente confiable y homologada de información, dada la dispersión de los datos disponibles actualmente. La metodología pretende no solo recopilar la información disponible sobre las áreas con procesos de restauración potencial del bosque (y otras coberturas forestales), sino también estimar la superficie con evidencia de recuperación forestal dentro de estas áreas.

2. La mitigación del cambio climático es la gestión que busca reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a través de la disminución de las fuentes y el aumento o la mejora de los sumideros y reservas de GEI. Incluye las políticas, programas, proyectos, incentivos o desincentivos y actividades relacionadas con la Estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono y la Estrategia nacional de REDD+ (Minambiente, 2016).



3

Consistentemente con los reportes de superficie de bosque y deforestación elaborados por el SMBYC del Ideam, la metodología del protocolo está diseñada y probada para el seguimiento de la restauración del bosque de acuerdo con la definición adoptada por Colombia³ para los reportes de los compromisos adquiridos frente al cambio climático. Sin embargo, es posible utilizar los mismos principios metodológicos para el seguimiento de otras coberturas forestales o arbóreas, establecidas bajo otras estrategias de restauración (p. ej.: cercas vivas, sistemas agroforestales, silvopastoriles).



4

La metodología permite generar reportes a nivel nacional y su posterior desagregación regional a partir del uso de las imágenes de sensores remotos. Se prioriza el uso de la teledetección por la capacidad que ofrece esta tecnología para realizar el seguimiento continuo de las coberturas de la tierra en extensiones geográficas amplias y con tiempos de procesamiento relativamente cortos (Liu *et al.*, 2019).



5

El protocolo está enfocado en el procesamiento de imágenes satelitales de mediana resolución. Adicionalmente, y de acuerdo con la disponibilidad, se emplean datos de sensores remotos de alta y muy alta resolución para detectar las ganancias que tienen lugar en las etapas iniciales del proceso y que no se observan en los insumos principales, y para la verificación y evaluación del mapa.

3. 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 de 30 %, una altura mínima de dosel de 5 metros al momento de su identificación y un área mínima de 1 hectárea. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria.



6 |

El monitoreo se implementa únicamente en las áreas reportadas con procesos de restauración, que pueden llevar potencialmente a la ganancia de cobertura de bosque; por lo tanto, los resultados obtenidos dependen de la calidad, completitud y oportunidad en el reporte de las áreas con iniciativas de restauración.



7 |

Se adoptan las metodologías y buenas prácticas 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); por lo tanto, la metodología del protocolo para estimar las superficies con restauración forestal se divide en dos fases: 1) el procesamiento de imágenes de satélite para generar la cartografía completa (pared a pared) de la ganancia del bosque y la vegetación leñosa en las áreas de restauración, y 2) la evaluación de exactitud temática y la estimación de las áreas a partir de un muestreo estadístico. Los datos de superficie que se reportan con la implementación del protocolo corresponden a las áreas estimadas derivadas del muestreo, por lo tanto, los valores no serán iguales a los calculados directamente por el conteo de píxeles de la capa geográfica generada en la primera fase.



8 |

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 usan las imágenes de satélite de alta y muy alta resolución disponibles para disminuir el tiempo de detección.



9 |

Este protocolo no incluye metodologías de monitoreo de variables ambientales y biológicas en campo, si bien plantea la verificación en terreno de una fracción de los sitios evaluados como parte del proceso de validación. A corto plazo se deberán incorporar datos de campo para realizar las estimaciones del incremento en el carbono almacenado.



10 |

La metodología propuesta no reemplaza el seguimiento de las condiciones físico-bióticas, socioeconómicas y de los servicios ecosistémicos a nivel local como herramienta indispensable para evaluar los resultados respecto a los objetivos propuestos y al restablecimiento de las condiciones bióticas deseadas de cada área o proyecto de restauración en particular.



11 |

El diseño metodológico del protocolo se realizó teniendo en cuenta las herramientas tecnológicas y métodos de procesamiento de imágenes de sensores remotos disponibles. Sin embargo, se insta a mejorar los procesos y usar nuevas herramientas en la medida en que se avance con el monitoreo y se acceda a nuevos desarrollos que mejoren la exactitud y disminuyan la incertidumbre de los datos.



12 |

Si bien el protocolo se diseñó y probó en la construcción de la línea base histórica 2007-2022 de las áreas con restauración potencial a bosque, en el corto plazo se implementará para el seguimiento de las otras coberturas forestales (cercas vivas, agroforestales, silvopastoriles, barreras rompevientos) y de las áreas de manejo forestal sostenible.



13 |

Teniendo en cuenta que la *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia* (NDC) incluye el establecimiento de sistemas silvopastoriles como parte de las acciones nacionalmente apropiadas de mitigación (NAMAs, por su sigla en inglés) para la ganadería bovina sostenible (Gobierno de Colombia, 2020), es necesario que se registren de manera independiente las estrategias agroforestales y silvopastoriles en las plataformas de reporte (actualmente se reportan como una sola estrategia).



CONTEXTO DE LA RESTAURACIÓN EN EL MARCO GLOBAL, POLÍTICO, NORMATIVO E INSTITUCIONAL

CONTEXTO GLOBAL

La restauración de ecosistemas, incluidos los bosques y los paisajes, fue declarada como una de las soluciones para la lucha contra el cambio climático, mejorar la seguridad alimentaria, el acceso al agua y la conservación de la biodiversidad. Las acciones de restauración de bosques y paisajes (RBP) aportarán a compromisos internacionales como los OD, la CMNUCC, incluido el mecanismo de REDD+, las metas Aichi de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica (CDB), y la Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (CNULD), entre otras (Buckingham *et al.*, 2019; IUCN, 2020; Ramírez y Morales, 2021). Dentro de las principales iniciativas globales para incrementar la restauración de los bosques, paisajes y ecosistemas se destacan las siguientes:



El desafío de Bonn y la Iniciativa 20x20: lanzado en 2011, el desafío de Bonn planteó el objetivo global de restaurar 150 millones de hectáreas para 2020, y 350 millones de hectáreas para 2030, con lo cual se espera capturar entre 13 y 16 Gt de gases de efecto invernadero (GEI) (Besseau *et al.*, 2018). Estas metas fueron aprobadas en la Declaración de los bosques de Nueva York de 2014⁴, respaldada por 189 gobiernos, empresas privadas, comunidades nativas y organizaciones de la sociedad civil.

Para apoyar esta meta se desarrollaron iniciativas regionales, incluida la Iniciativa 20 x 20 de América Latina (IUCN, 2020; Ramírez y Morales,

I 4. Véase <https://nydfglobalplatform.org/>



2021), en la que se insta a la restauración de 20 millones de hectáreas a 2020, objetivo que posteriormente se incrementó a 50 millones de hectáreas de bosques, granjas, pastizales y otros paisajes a 2030. En el logro de estas metas se adoptó un enfoque flexible llamado restauración del paisaje forestal (FLR), que busca restaurar la integridad ecológica al tiempo que mejora el bienestar humano. La iniciativa fue lanzada formalmente en la COP 20 del CDB, de 2014, en Lima.



Convenio de Diversidad Biológica (CDB), metas

Aichi y STAPER: el artículo 8 de la convención de CDB declara que las partes deberán, dentro de lo posible, rehabilitar y restaurar los ecosistemas degradados y promover la recuperación de especies en peligro a través de la elaboración y aplicación de planes u otras estrategias de gestión.

En la 10.^a Conferencia de las Partes (COP 10 del CDB) se adoptaron los objetivos de biodiversidad de Aichi (ABTs), una serie de 20 metas cuantificables que debían cumplirse antes de 2020, entre las que se incluía la restauración de los ecosistemas degradados como parte de los retos propuestos (ABT 15). Se espera que la restauración ocupe un lugar destacado en el marco global post 2020, que se está negociando (Gann *et al.*, 2019).

Así mismo, en la COP 13 del CDB de 2016, las partes adoptaron el plan de acción a corto plazo de la restauración de ecosistemas (STAPER), un marco flexible de 24 pasos para implementar la restauración en los niveles nacionales, regionales, subnacionales y de lugar dentro de una perspectiva de paisajes terrestres y marinos (CDB, 2016).



Decenio de Restauración de Ecosistemas de las Naciones Unidas (2021-2030):

en 2019, atendiendo la propuesta impulsada por más de 70 países, la Asamblea de Naciones Unidas declaró el decenio 2021-2030 como la “Década de la Restauración de los Ecosistemas”, con el objetivo de apoyar y ampliar los esfuerzos encaminados a prevenir, detener y revertir la degradación de los ecosistemas en todo el mundo y crear conciencia sobre la importancia de una restauración exitosa, reconociendo que bosques, humedales, tierras áridas y otros ecosistemas naturales son esenciales para el desarrollo sostenible, la reducción de la pobreza y el mejoramiento del bienestar humano (ONU, 2019). La iniciativa es liderada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la FAO, en coordinación con otros socios, y constituye un llamado mundial a la acción para unir el apoyo político, la investigación científica y la capacidad financiera en el objetivo común de ampliar a gran escala la restauración, así como una oportunidad para que los gobiernos nacionales, subnacionales y locales, las comunidades y cualquier persona de la sociedad civil se unan, adoptando la restauración como un camino a la recuperación del bienestar y la reducción de los riesgos asociados al cambio climático (Ramírez y Morales, 2021).

En el marco de esta iniciativa se crea el Grupo de Trabajo sobre Monitoreo (Monitoreo FT), que reúne a 219 expertos de 82 organizaciones, encargado del desarrollo colaborativo de un Marco para el monitoreo de la restauración de ecosistemas (FERM). Este marco es una guía para el seguimiento del progreso en la restauración a lo largo del decenio, por lo que plantea indicadores, herramientas, presentación de informes y cronogramas para los reportes⁵.

5. Tomado de la nota informativa sobre el Grupo de trabajo sobre seguimiento del Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas 2021-2030 (2020, 15 de diciembre).



CONTEXTO NACIONAL

LINEAMIENTOS POLÍTICOS Y NORMATIVOS DE LA RESTAURACIÓN

Colombia tiene una historia de más de medio siglo en restauración ecológica (Murcia y Guariguata, 2014). En el contexto nacional, la restauración como estrategia para la gestión de los bosques y ecosistemas se adopta en la década de los noventa con la formulación del *Plan estratégico para la restauración y el establecimiento de bosques en Colombia* (Plan Verde) de 1998, la *Guía metodológica para la restauración de ecosistemas a partir del manejo de la vegetación* de 2003 y el *Protocolo de restauración de coberturas vegetales afectadas por incendios forestales* de 2006 (Minambiente, 2015). En las metas de la *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos* (PNGIBSE), la restauración ecológica se concibe como parte de la estrategia para incrementar la resiliencia de los sistemas socioecológicos y como un aporte de la biodiversidad a las reservas de carbono, que contribuye a la mitigación y adaptación frente al cambio climático (Minambiente, 2012). Este enfoque es recogido en el diseño, la adopción y la implementación del *Plan nacional de restauración, recuperación y rehabilitación de ecosistemas degradados* (PNR), publicado inicialmente en 2012, cuya versión final es de 2015 (Minambiente, 2015).

En 2017, la *Política nacional de cambio climático* establece como una de sus cinco líneas estratégicas el manejo y la conservación de los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos para el desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima, promoviendo acciones que permitan analizar e incorporar los escenarios de impacto del cambio climático en la conservación y restauración de los ecosistemas terrestres y

marino costeros prioritarios por su vulnerabilidad, integrando el trabajo conjunto de las autoridades ambientales con el apoyo de los institutos de investigación ambiental (Minambiente, 2016).

Recientemente, la *Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques* (Conpes 4021 de 2020) contempla como parte de sus líneas estratégicas el impulso de modelos de restauración orientados a la preservación, el desarrollo productivo y la reactivación económica a nivel local y comunitario, en concordancia con los lineamientos del PNR, a través de la estructuración de proyectos por parte de los actores nacionales y regionales, especialmente en las áreas de alta deforestación. Así mismo, dentro de las acciones para generar esquemas de monitoreo y seguimiento a las intervenciones territoriales asociadas al control de la deforestación, se asigna al Ideam, con el apoyo de Minambiente y del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Minagricultura), la tarea de liderar el diseño y posterior implementación de cuatro módulos de seguimiento del recurso forestal, incluidos el módulo de las áreas en proceso de restauración y el de áreas de manejo forestal sostenible (DNP, 2020).

De otro lado, atendiendo los compromisos adquiridos por el país frente a la CMNUCC, la Ley 1931 de 2018 establece que el SMBYC del Ideam será el encargado de generar la información oficial para la adopción de medidas que conduzcan a reducir la deforestación y contribuyan a la planificación y gestión sostenible de los bosques naturales en el territorio colombiano, y para el cumplimiento de los compromisos de Colombia frente a la CMNUCC, y otros acuerdos internacionales, así como para la elaboración de los Niveles de Referencia de las Emisiones Forestales (NREF). Así mismo, la *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*⁶, aprobada en diciembre

6. 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 5 años.



Fotografía: Aon Khanisorn / www.shutterstock.com

de 2020 por la Comisión Intersectorial de Cambio Climático, incorpora la conservación, restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de ecosistemas estratégicos (páramos, manglares, humedales, arrecifes de coral, glaciares, océanos y bosques tropicales) como parte de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. El portafolio de Colombia en la NDC incluye medidas para la masificación de la restauración ecológica, que buscan comenzar o acelerar procesos de restablecimiento de áreas de ecosistema boscoso degradado, dañado o destruido con relación a su función, estructura y composición, en línea con el PNR, con una meta de 962.615 ha restauradas (2015-2030) y un potencial de mitigación de 16,94 Mt de CO₂ eq (Gobierno de Colombia, 2020).

En concordancia con los compromisos adquiridos, la Ley 2169 de 2021, por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país, establece que el sector ambiental deberá incorporar, en los instrumentos sectoriales de planificación existentes y futuros,

acciones orientadas a la masificación de soluciones basadas en la naturaleza en áreas boscosas y ecosistemas degradados para la conservación ecosistémica, incluidas las acciones de restauración ecológica, recuperación, rehabilitación, protección y uso sostenible de los ecosistemas, que apuntarán a la restauración de por lo menos un millón de hectáreas acumuladas en 2030. Adicionalmente, la Ley 2169 establece un Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático (SNICC), en el que incorpora al SMyC del Ideam como parte del sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de mitigación a nivel nacional, y al SNIF y al IFN como parte de los instrumentos del SNICC.



Plan nacional de restauración, rehabilitación y recuperación (Minambiente, 2015): para hacer frente al deterioro progresivo de los ecosistemas del país, Minambiente elaboró el *Plan nacional de restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas degradadas* (PNR), que tiene



como objetivo a 20 años: “Orientar y promover la restauración ecológica, la recuperación y la rehabilitación de áreas disturbadas de Colombia en un marco amplio de conservación de la biodiversidad y la adaptación a los cambios globales” (Minambiente, 2015).

EL PNR acoge las directrices establecidas en la PNGIBSE (Minambiente, 2012) y enfoca las actividades y estrategias atendiendo tres enfoques de implementación: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación, de acuerdo con el nivel de restablecimiento del ecosistema original, los servicios ecosistémicos y la autosostenibilidad del sistema.

Como parte de las acciones del PNR se establece la necesidad de incorporar una estrategia de monitoreo a la restauración para realizar el seguimiento y evaluar indicadores de éxito a escala nacional mediante la selección de indicadores robustos y de fácil medición y el levantamiento estandarizado de los datos, lo que permitirá comparar los cambios estructurales en el paisaje a mediano y largo plazo (Minambiente, 2015). El *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques*, aplicable a otras coberturas forestales, se diseñó siguiendo las principales directrices y enfoques incluidos en el PNR.



Metas de restauración de los últimos cuatrienios:

el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010-2014 se propuso como meta restaurar o rehabilitar 90.000 hectáreas con fines de protección, así como la adopción e implementación del PNR, promoviendo la formulación de programas para el desarrollo de tecnologías de la restauración (DNP, 2011). En el periodo 2014-2018, como parte de la estrategia de conservar y asegurar el uso sostenible del capital natural marino y continental de la Nación, se incrementa la meta a 300.000 hectáreas restauradas (DNP, 2015). Para el cuatrienio 2018-2022 se propuso duplicar las hectáreas con sistemas productivos sostenibles y de conservación, incluida la restauración de siste-

mas agroforestales y áreas de manejo forestal, que pasó de 701.000 a 1.400.000 hectáreas, bajo estas figuras el Sistema Nacional de Evaluación de Gestión y Resultados (Sinergia)⁷ del DNP reportó un resultado de 608.311 hectáreas. Así mismo, el PND 2018-2022 asignó al Ideam la tarea de consolidar un sistema nacional de información, monitoreo y reporte sobre restauración articulado a los demás sistemas de información existentes (DNP, 2019).

Actualmente, en el PND para el periodo 2022-2026, el programa de conservación de la naturaleza y su restauración, mediante la restauración participativa de ecosistemas, áreas protegidas y otras áreas ambientalmente estratégicas, busca incrementar los procesos de restauración y conservación de la base natural como una de las estrategias para compensar el impacto de la deforestación y del cambio climático. Así mismo, se propone fortalecer el monitoreo, el reporte y la verificación de proyectos de restauración implementados para fortalecer la efectividad de las inversiones. Específicamente, establece la meta de incrementar las áreas en restauración, recuperación y rehabilitación de ecosistemas degradados en 753.000 hectáreas (DNP, 2022b) a través de la Estrategia Nacional de Restauración 2022-2026.

MONITOREO DE LA COBERTURA DE BOSQUES Y RECURSOS FORESTALES EN COLOMBIA

De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1655 de 2017 de Minambiente, el SNIF, el IFN y el SMBByC hacen parte del Sistema de Información Ambiental para Colombia (SIAC) y son los instrumentos diseñados para generar información oficial que permita tomar decisiones, formular políticas y normas para la planificación y gestión sostenible de los bosques en el territorio colombiano, sistemas administrados y coordinados por el Ideam.

7. El Sistema Nacional de Evaluación de Gestión y Resultados (Sinergia) del DNP fue creado con el fin de hacer seguimiento y evaluación de las políticas públicas estratégicas del país, especialmente aquellas estipuladas en el PND. Véase DNP (2022a).



Sistemas de Monitoreo de Bosques y Carbono

(SMBYC): se creó en 2012, a partir del trabajo realizado desde 2009 en el proyecto “Capacidad institucional técnica científica para soportar proyectos REDD+”, financiado por la Fundación Gordon y Betty Moore. De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1655 de 2017, el SMBYC es concebido como el conjunto de procesos, metodologías, protocolos y herramientas para la generación periódica de información sobre: 1) la superficie de bosques de Colombia y sus cambios en el tiempo, 2) las reservas de carbono almacenadas en los bosques naturales, 3) las causas y agentes de la deforestación y la degradación de los bosques y, 4) las emisiones y absorciones de GEI asociadas a la deforestación y la degradación forestal (Decreto 1655 de 2017).

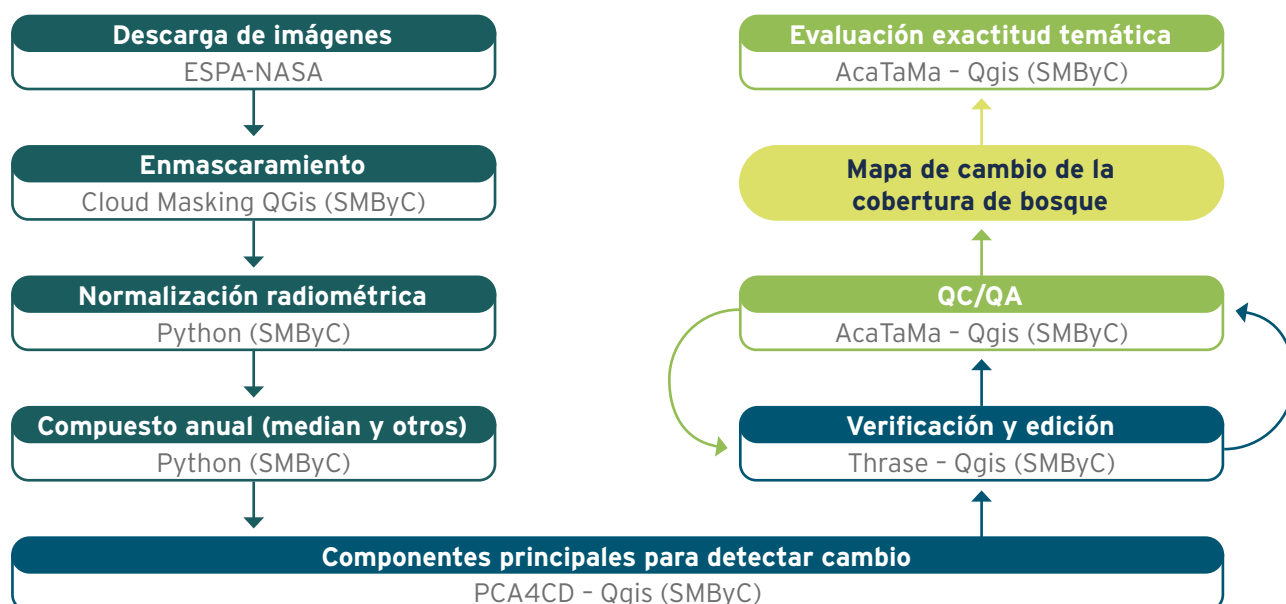
Desde 2013, el SMBYC cuantifica anualmente la superficie de bosque y los cambios asociados a esta cobertura utilizando una metodología de

procesamiento digital de imágenes de satélite semiautomatizada, una sinergia entre el uso de algoritmos automatizados y el ajuste de los resultados por parte de intérpretes expertos para mejorar la exactitud temática. Como insumo principal se utilizan las imágenes del programa satelital Landsat, con el apoyo de datos de otros sensores de mediana y alta resolución disponibles. Todo el proceso se lleva a cabo empleando *software* libre (Galindo *et al.*, 2014; Ideam, 2019), con algoritmos y aplicaciones desarrolladas por el SMBYC de acuerdo con los requerimientos específicos de la metodología (figura 1).

Concibiendo el monitoreo de la restauración del bosque como un módulo del SMBYC y buscando armonizar los resultados con los datos generados sobre la superficie y cambio de la superficie cubierta por bosque natural, el *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques* incorpora los lineamientos metodológicos, insumos y desarrollos del SMBYC para el seguimiento de las áreas en restauración.

Figura 1

Esquema general del protocolo de procesamiento digital de imágenes diseñado e implementado por el SMBYC para generar las cifras anuales de superficie y cambio de la superficie de bosque



Fuente: Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC).



Sistema Nacional de Información Forestal

(SNIF): se define como el conjunto integrado de procesos, metodologías, protocolos y herramientas, que estandariza el acopio, registro, verificación, almacenamiento, procesamiento, generación y divulgación de información forestal, para el manejo y consulta de datos y estadísticas, mediante el flujo e intercambio eficiente, oportuno, transparente y de calidad de la información como soporte básico de la gestión integral del recurso forestal. Dentro de sus objetivos se encuentra el de desarrollar los instrumentos y mecanismos necesarios para la gestión de la información forestal, garantizando la interoperabilidad con otros sistemas de información, así como adoptar y desarrollar estándares, protocolos, procesos y soluciones

tecnológicas para la captura, generación, procesamiento, flujo y divulgación de la información sobre el estado y aprovechamiento de los recursos forestales (Decreto 1655 de 2017).



Inventario Forestal Nacional (IFN): el objetivo principal del IFN de Colombia es proveer información periódica con enfoque multipropósito sobre la estructura, composición y diversidad florística, biomasa aérea, carbono, volumen de madera, condiciones y dinámica de los bosques, generando información estandarizada, confiable, consistente y continua para la toma de decisiones del sector forestal y la planificación del territorio a nivel nacional. Su implementación con la recopilación de información en terreno se inició en 2015 (Ideam, 2018).



Fotografía: Valle de Cocora, Quindío / Anamaria Mejia / www.shutterstock.com

APLICATIVOS PARA LA RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LAS ÁREAS EN RESTAURACIÓN



Aplicativo de proyectos de restauración (Minambiente)⁸: administrado por la Dirección de Bosques Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (DBBSE) de Minambiente, busca visibilizar y fortalecer las acciones que vienen desarrollando las organizaciones y diferentes comunidades en la implementación de proyectos de restauración en Colombia. En esta plataforma se registran los proyectos desarrollados por entidades distintas a las autoridades ambientales, incluidos los institutos de investigación adscritos a Minambiente, los entes territoriales (alcaldías, gobernaciones), cooperación internacional, la academia, las organizaciones no gubernamentales (ONG) ambientales, el sector productivo, entre otros. El registro no tiene obligatoriedad normativa, si bien se insta a las entidades a incluir la información a su cargo para el seguimiento de las metas nacionales. Los datos geográficos se registran como polígonos, junto con la información alfanumérica asociada de enfoques y estrategias de restauración, disturbios, costos de la implementación, origen de los recursos, especies utilizadas, datos de las entidades que reportan, familias beneficiadas, implementación de viveros y monitoreo, entre otros. Este aplicativo recopila información desde 2019.



Aplicativo del Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) (Ideam)⁹: el SNIF incluye la herramienta informática para el reporte de

los aprovechamientos y movilizaciones de productos forestales, maderables y no maderables, decomisos forestales, remisiones de madera de plantaciones forestales, incendios de la cobertura vegetal y plantaciones forestales protectoras. La herramienta es creada en 2006 para la captura de información relacionada con el uso, la demanda y la administración de los recursos boscosos¹⁰. Desde 2020, el módulo de plantaciones forestales protectoras recopila la información de las áreas en restauración siguiendo la estructura definida en conjunto con Minambiente para el aplicativo de proyectos de restauración. La información es suministrada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), de desarrollo sostenible y las autoridades ambientales de los grandes centros urbanos en las áreas de su jurisdicción, y su reporte es obligatorio por normatividad.



Sistema para el Análisis y Gestión de Información del Licenciamiento Ambiental (Ágil) (ANLA)¹¹: la ANLA es la entidad responsable de administrar el funcionamiento del Sistema para el Análisis Geográfico de Información en el Licenciamiento Ambiental (SIGWeb). La plataforma permite consultar, entre otras, información geográfica de las áreas de compensaciones por licenciamiento ambiental por marcos normativos, como: 1) información presentada antes de 2012, previo a la entrada en vigencia del *Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad*, 2) información presentada en el marco del *Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad* (MCPB) 2012 y 3) información presentada en el marco del *Manual de compensaciones del componente biótico* (MCCB) 2018. Igualmente, se incluyen las inversiones obligatorias del 1% en formato de polígonos, líneas o puntos, de

8. <https://restauracion5m-mads.hub.arcgis.com/>

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

10. Véase <http://www.ideam.gov.co/web/siac/modulo-uno-snif>

11. <http://sig.anla.gov.co:86/seleccion.aspx>

acuerdo con la naturaleza de la inversión. Los datos son generados por las empresas y consolidados por la ANLA. La base de datos geográfica reúne información de las distintas actividades de compensación contempladas en la normatividad para el licenciamiento ambiental, incluidas las acciones de restauración, información que es reportada posteriormente en la plataforma del SNIF (Ideam).

OTRAS HERRAMIENTAS PARA LA PLANEACIÓN Y EL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN



Mapa de áreas para la restauración (Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt): es una herramienta geográfica de planificación de la restauración de bosques, diseñada por el Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) en conjunto con el Instituto Internacional para la Sostenibilidad de Australia, que permite identificar las áreas prioritarias para implementar la restauración, evaluando distintos escenarios a partir de los beneficios, costos y distribución de las prioridades de restauración. En la herramienta se considera un balance entre el beneficio de la mitigación del cambio climático, estimado a partir del cambio en el almacenamiento de carbono que proviene de la restauración; el beneficio de la conservación de la biodiversidad, estimado a partir de la reducción promedio del riesgo de extinción de las especies; y los costos de oportunidad y de establecimiento de la restauración. La información geográfica se genera con una resolución espacial de 500 metros y se encuentra disponible para consulta interactiva por parte de los usuarios en la plataforma de WePlan - Forests¹².



Mapa de áreas priorizadas para la restauración de ecosistemas de manglar (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés"): el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y Minambiente desarrollaron el mapa de prioridades de restauración de ecosistemas de manglar, elaborado a partir de la sumatoria de criterios biofísicos y socioeconómicos, incluidas las características propias del ecosistema, elementos de organización territorial y factores limitantes. El mapa de las áreas de manglar priorizadas para restauración en Colombia está dispuesto en un visor geográfico junto con información de soporte para orientar al usuario en la toma de decisiones¹³.



Guías y protocolos de monitoreo de restauración de ecosistemas: en la última década, el IAvH viene desarrollando proyectos de investigación e implementación de la restauración en ecosistemas estratégicos del país en humedales, páramos y bosques secos y húmedos, desarrollando portafolios para definir estrategias de implementación y monitoreo de procesos de restauración ecológica. En 2015, publicó el protocolo de *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*, una guía para investigadores y el sector ambiental en la que se incluyen criterios, indicadores y cuantificadores específicos aplicados a diversos grupos taxonómicos y escalas, que van desde el paisaje, pasando por aspectos socioeconómicos, el suelo, la vegetación y grupos indicadores de fauna de hormigas, escarabajos, aves, herpetofauna y mamíferos (Aguilar-Garavito y Ramírez 2015).

12. <http://weplan-colombia.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/>

13. <https://storymaps.arcgis.com/stories/128c2a7258d74383a47617b313079829>



MARCO TEÓRICO Y DEFINICIONES ADOPTADAS PARA EL PROTOCOLO

MARCO TEÓRICO

Pág 29.

**DEFINICIONES ADOPTADAS PARA EL DISEÑO
DEL PROTOCOLO**

Pág 52.



MARCO TEÓRICO

RESTAURACIÓN DE BOSQUES Y ECOSISTEMAS

En los últimos años se viene adoptando una aproximación holística de la restauración que va más allá de la restauración ecológica propiamente dicha, abarcando un marco amplio de actividades que tienen en cuenta no solo las condiciones biológicas de los ecosistemas sino también el beneficio para las comunidades, aproximación acogida en la iniciativa de la Década de la Restauración de Ecosistemas de las Naciones Unidas e incorporada en Colombia en el PNR (Minambiente, 2015), así como en el desarrollo de las metas de restauración del país.

Existen diversas definiciones asociadas a la restauración, entre ellas:

1

Restauración: cualquier actividad intencional que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema de un estado degradado (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2018).

2

Restauración de ecosistemas: proceso de asistencia en la recuperación de los ecosistemas que han quedado degradados, dañados o destruidos (Gann *et al.*, 2019; SER, 2004), con hincapié en el establecimiento de los procesos ecológicos necesarios para que los ecosistemas terrestres y acuáticos sean sostenibles, resilientes y saludables, tanto en las condiciones actuales como en el futuro, y que mejoren el bienestar de los seres humanos (FAO, 2020).

3

Restauración de ecosistemas: el proceso de detener y revertir la degradación del ecosistema, cuyo resultado se ve reflejado en mejores servicios ecosistémicos, salud y recuperación de la biodiversidad (ONU *et al.*, 2021).

4

Restauración de bosques y paisajes (RBP):

proceso de recuperación productiva, ecológica y funcional para mejorar los medios de vida en paisajes deforestados o degradados. Es un medio para recuperar, mejorar y mantener las funciones productivas, ecológicas, económicas y sociales vitales a largo plazo que conducen a paisajes más resistentes y sostenibles (FAO, 2019). También se puede comprender como un proceso activo que reúne a las personas para identificar, negociar e implementar prácticas que restablezcan un equilibrio óptimo acordado de los beneficios ecológicos, sociales y económicos de los bosques y árboles dentro de un patrón más amplio de usos de la tierra (Besseau *et al.*, 2018).

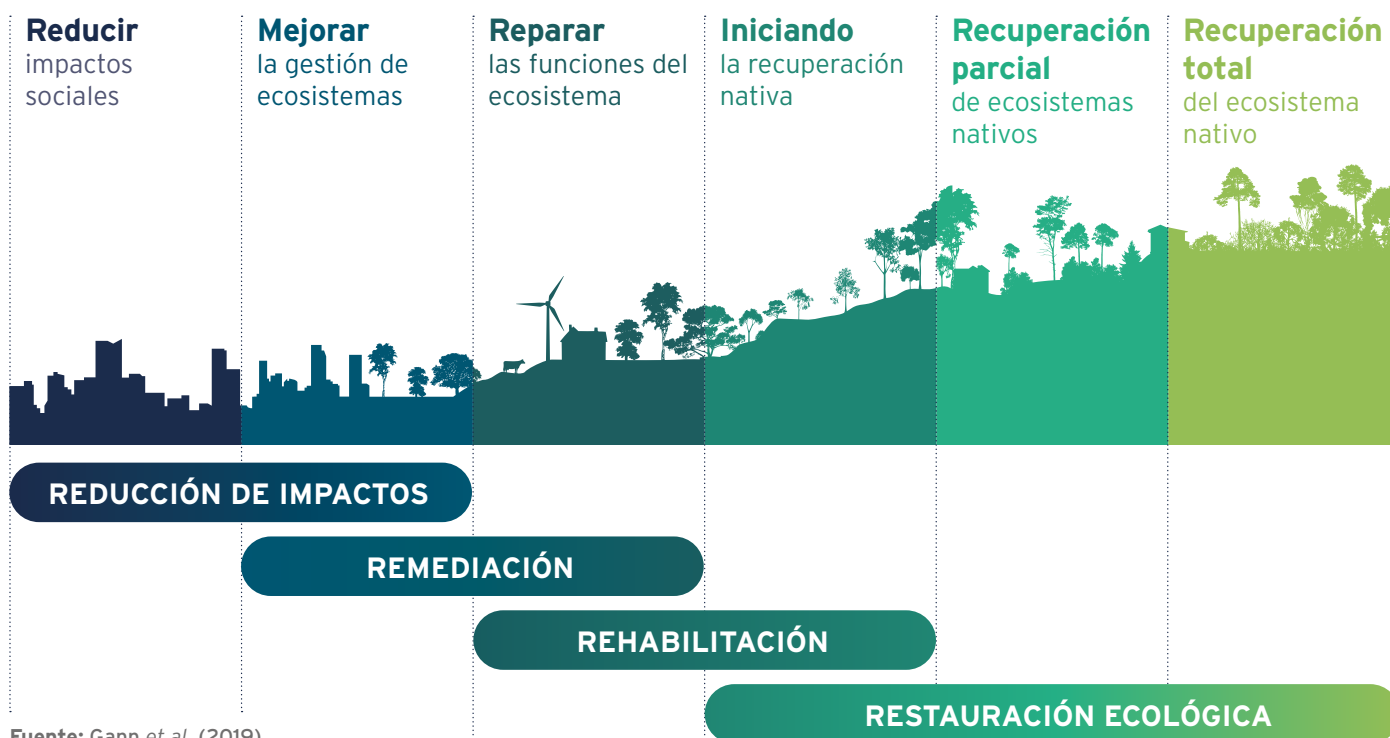
Esta aproximación holística de la restauración permite seleccionar la más apropiada entre un continuo de actividades de restauración, de acuerdo con el grado de disturbio, las condiciones ambientales, sociales y financieras particulares. De acuerdo con los principios y estándares para la práctica de la restauración ecológica definidos por la Sociedad de Restauración Ecológica (SER) (Gann *et al.*, 2019) y adoptados en la iniciativa de la “Década de Restauración de Ecosistemas”, las actividades o estrategias de restauración se enmarcan dentro de cuatro categorías principales (figura 2): 1) reducción de impactos, 2) reclamación, recuperación o remediación, 3) rehabilitación y 4) restauración ecológica (Gann *et al.*, 2019; FAO *et al.*, 2021). Las tres últimas corresponden a los tres enfoques establecidos en el PNR para el país (Minambiente, 2015) y han sido incorporadas en el diseño de las plataformas que recogen las iniciativas de restauración implementadas en el territorio nacional del SNIF (Ideam) y Minambiente.

Figura 2

Esquema del conjunto de actividades de restauración propuestas por SER adaptadas por la ONU para la Década de la Restauración de los Ecosistemas

ACTIVIDADES DE RESTAURACIÓN

Mejorando la biodiversidad, salud y servicios ecosistémicos



Fuente: Gann *et al.* (2019).



Fotografía: adtaphol chaimongkol / www.shutterstock.com

En general, la mayoría de las definiciones y conceptos asociados a la restauración incluyen cuatro aspectos básicos:

1

La intencionalidad e intervención en el proceso:

la restauración implica llevar a cabo acciones e intervenciones deliberadas para su implementación (FAO, 2020; Gann *et al.*, 2019; IPBES, 2018;

SER, 2004; Stanturf *et al.*, 2019), de forma que el logro del objetivo se asocia a una intención, ayuda, asistencia, intervención o gestión humana (Murcia y Guariguata, 2014). En concordancia, el protocolo de monitoreo de la restauración de bosques se implementa únicamente en las áreas reportadas con iniciativas de restauración, garantizando así la intencionalidad de las acciones para recuperar el bosque y otras coberturas forestales, lo que podría incrementar las posibilidades



de permanencia de los resultados. Si bien la regeneración natural o sucesión del bosque fuera de las áreas en restauración juega un papel importante en la dinámica de las coberturas forestales y la captura de carbono (Chazdon *et al.*, 2016; Lewis *et al.*, 2019; Martin *et al.*, 2013), podría estar asociada a eventos fortuitos y temporales de tipo legal, social y económico, conflictos, prácticas de manejo de sistemas productivos, etc., por lo que disminuye la posibilidad de persistencia a largo plazo.

2

El resultado deseado respecto a las condiciones previas:

es decir, el objetivo deseado en relación con el nivel de recuperación de las condiciones del ecosistema original. Desde el punto de vista de los enfoques o categorías, las iniciativas de restauración ecológica buscan retornar el ecosistema a un estado similar al original, utilizando como referencia un área con baja intervención para planear la implementación, sin importar el tiempo que tome alcanzar el objetivo (FAO, 2019; Gann *et al.*, 2019; SER, 2004). Este enfoque maximiza los beneficios para la biodiversidad, la salud del ecosistema y los servicios ecosistémicos (Gann *et al.*, 2019; Minambiente, 2015; SER, 2004). En el caso de la rehabilitación, se recuperan únicamente algunas de las especies y servicios ecosistémicos, siendo el principal objetivo obtener una provisión renovada y continua de estos, más que la recuperación de la biodiversidad y la integridad total de un ecosistema nativo (Gann *et al.*, 2019; Hanson *et al.*, 2015; Ramírez y Morales, 2021). Por su parte, con la remediación o recuperación se busca transformar una zona severamente degradada a un estado adecuado para el uso humano, recuperando algunos servicios ambientales de interés social diferentes a los del ecosistema original y, finalmente, la reducción de impactos hace referencia a las acciones encaminadas a implementar prácticas menos dañinas de consumir y utilizar los servicios ecosistémicos (Gann *et al.*, 2019; Hanson *et al.*, 2015; Minambiente, 2015).

En el caso específico del protocolo, se busca medir la ganancia de bosque natural (acorde con la definición adoptada por el país) en áreas donde no se encuentra presente esta cobertura en el momento de implementar las iniciativas de restauración. Se monitorean las áreas reportadas con estrategias de restauración ecológica, aunque puede incluir también estrategias de rehabilitación que conlleven el establecimiento de coberturas forestales con las características de altura, cobertura, área y uso incluidas en la definición adoptada. El protocolo es aplicable también para el seguimiento de otras coberturas forestales.

3

Condiciones que se quieren recuperar: dentro de las condiciones a restaurar explícitas en las definiciones se incluye la salud del ecosistema, la integridad, la resiliencia y la sostenibilidad, la diversidad biológica, las características ecológicas de composición, la estructura y la funcionalidad, los servicios ecosistémicos y los beneficios sociales y económicos.

El protocolo está diseñado para medir la extensión de la cobertura de bosque restaurado, lo que permitirá, posteriormente, estimar el incremento en la absorción y almacenamiento del carbono, generando datos y reportes más completos frente a los compromisos globales del cambio climático, los mecanismos REDD+ y el avance en el logro de las metas planteadas en el país.

4

El componente social: en las últimas décadas, el concepto de restauración ecológica y en general de actividades de restauración ha evolucionado para involucrar la dimensión social (Martin, 2017), incorporando como parte de los objetivos los beneficios para las personas y las comunidades (Fondo Mundial para la Naturaleza [WWF] e IUCN, 2000; Murcia y Guariguata, 2014; FAO, 2019; Gann *et al.*, 2019; Ramírez y Morales, 2021; FAO *et al.*, 2021).



MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE INTEGRADO A LOS SISTEMAS NACIONALES DE MONITOREO DEL BOSQUE

Los proyectos de restauración requieren de la observación, registro y monitoreo periódico de los resultados obtenidos para determinar si se están cumpliendo las metas y objetivos, o si es necesario realizar ajustes bajo un enfoque de gestión adaptativa (Gann *et al.*, 2019). Antes de diseñar un sistema de monitoreo, es importante decidir cómo se va a medir el progreso de los objetivos, creando un conjunto de metodologías e indicadores que puedan sostenerse a largo plazo (Buckingham *et al.*, 2019).

El seguimiento de la restauración integrado al SMByC debe estar acorde con el monitoreo de los demás cambios del bosque, incorporando las buenas prácticas definidas por el IPCC, esto es, que los datos utilizados para reportar las emisiones forestales deben ser transparentes, documentados, consistentes en el tiempo, completos, comparables, sujetos a control de calidad, evaluados para estimar las incertidumbres y eficientes en el uso de los recursos disponibles para las instituciones (IPCC, 2006; GFOI, 2020).

El diseño del plan de monitoreo incluye la selección de las preguntas específicas que se abordarán y los indicadores que se usarán para medir el progre-

so, el diseño de muestreo para recopilar información de referencia, la metodología de implementación y el tratamiento de los datos, así como el procedimiento para documentar y comunicar los resultados (Gann *et al.*, 2019). En general, la implementación y el monitoreo de los planes y proyectos de restauración deben responder cuatro preguntas básicas: 1) ¿Qué?, es decir, las definiciones y tipología adoptada; 2) ¿Por qué?, o los objetivos que se evalúan; 3) ¿Cómo?, respecto a los mecanismos técnicos usados; y 4) ¿Dónde?, para identificar los sitios que se desean monitorear (WWF e IUCN, 2000).

En el caso particular del bosque, resulta recomendable integrar las tareas de monitoreo de la restauración a las mismas entidades encargadas de los Sistemas Nacionales de Monitoreo Forestal (SNMF), con el objetivo de reducir la duplicidad de esfuerzos, favorecer la sostenibilidad del proceso y facilitar la coherencia y transparencia de la información respecto a los demás reportes de la superficie del bosque. La FAO y el Programa ONU-REDD establecen una serie de pasos básicos y buenas prácticas para realizar esta integración, recomendaciones que han sido incorporadas en el diseño de este protocolo (Ramírez y Morales, 2021):



1

Identificar las instituciones y actores claves involucrados en el desarrollo y seguimiento de las actividades de restauración.

NIVEL NACIONAL



2 |

Revisar las definiciones y la tipología que se usará. Es importante que se revisen los términos relacionados a la restauración para facilitar la comunicación.



3 |

Determinar el nivel geográfico del monitoreo: nacional, regional, municipal, predial, etc.



4 |

Identificar las necesidades de información con base en los objetivos de la restauración: si el país cuenta con una estrategia, políticas o plan de restauración y metas nacionales establecidas, se deben analizar los objetivos e indicadores estratégicos de la restauración que fueron definidos y, si es necesario, complementarlos o mejorarlos.



5 |

Identificar los requisitos y necesidades de información para los reportes.



6 |

Establecer claramente las definiciones de las categorías de cobertura de la tierra, especialmente las definiciones operativas de bosque, teniendo en cuenta que el proceso de monitoreo a gran escala, especialmente si se emplean sensores remotos, se realiza sobre los cambios de las coberturas.



7 |

Ubicar las áreas que se encuentran en procesos de restauración para el monitoreo.



8 |

Definir y priorizar las preguntas del monitoreo. Esto permite establecer los indicadores, las métricas por utilizar y los atributos que se medirán para obtenerlos.



9 |

Definir de la periodicidad para la medición.



10 |

Identificar los componentes del monitoreo: sensores remotos, parcelas, registros administrativos, parcelas de campo, encuestas, censos, etc., y diseñar los métodos de medición y herramientas tecnológicas para cada uno.



11 |

Fortalecer las capacidades para garantizar y mejorar la calidad de la información y de los resultados.



12 |

Establecer las estrategias de sostenibilidad del sistema de monitoreo a corto y mediano plazo.

NIVEL NACIONAL

En general, los métodos para el monitoreo de la restauración establecen una serie de medidas y atributos clave basados en la toma de datos en campo a nivel de proyectos que permiten evaluar los cambios en la composición, estructura y función de los ecosistemas y la estimación de indicadores biológicos, ambientales, de servicios ecosistémicos, beneficios socioeconómicos, entre otros (SER, 2004; Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015; Buckingham *et al.*, 2019; Gann *et al.*, 2019, 2022; FAO y PNUMA, 2022). Estas medidas son fundamentales para evaluar el logro de los objetivos propuestos en cada una de las intervenciones, permitiendo corregir las acciones en caso de ser necesario, además de brindar información clave para mejorar el conocimiento sobre los procesos de regeneración y sucesión del bosque, la ecología de la restauración y las mejores prácticas y estrategias de implementación (SER, 2004; Gann *et al.*, 2019, 2022; Ramírez y Morales, 2021).

Si bien el monitoreo de estas variables es indispensable para evaluar los proyectos y su influencia en el paisaje circundante, el uso de datos tomados en campo ofrece un desempeño inverso entre el nivel de detalle y el cubrimiento geográfico, debido a los altos costos y requerimientos logísticos para su implementación y el mantenimiento a mediano y largo plazo, cuando se desea obtener información en áreas geográficas extensas, lo que lo hace poco factible. Adicionalmente, no siempre se cuenta con protocolos estandarizados de uso común para integrar y analizar los datos provenientes de las intervenciones individuales (Bey *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019; McKenna *et al.*, 2023; Huettermann *et*

al., 2023). En consecuencia, se suele tener una baja comprensión acerca de la eficacia de los esfuerzos o las repercusiones de las intervenciones de restauración a largo plazo en los niveles nacionales, de forma que los países no siempre cuentan con las herramientas para generar reportes precisos y consistentes de los logros obtenidos con los recursos invertidos y las acciones implementadas (Bey *et al.*, 2016; Sacande *et al.*, 2021).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, los enfoques, objetivos, alcances, necesidades de información, indicadores, herramientas y metodologías disponibles para diseñar e implementar un sistema de monitoreo de la restauración del bosque dependerán de la escala o nivel geográfico requerido (tabla 1). El monitoreo a nivel global se enfoca en medir los avances en los acuerdos e iniciativas globales o de grandes regiones (desafío de Bonn, Iniciativa 20x20, ODS, etc.) y los balances globales de coberturas, diversidad, carbono, efectos sobre el cambio climático, etc. En contraste, el monitoreo de las intervenciones individuales busca evaluar detalladamente el cumplimiento de los objetivos propuestos a una escala local, recopilando datos sobre la vegetación, la fauna, los suelos, las condiciones sociales, etc. En un nivel medio se encuentran los sistemas de monitoreo nacionales, nivel para el que se establece este protocolo, y que suele enfocarse principalmente en el seguimiento de la efectividad de políticas, estrategias, inversiones y metas, brindando datos a los tomadores de decisiones y mejorando los reportes nacionales frente a los compromisos globales (Reytar *et al.*, 2020)



Fotografía: Parque Nacional Chiribiquete, San José del Guaviare / Andreas Zeitler / www.shutterstock.com



NIVEL NACIONAL

Tabla 1

Niveles geográficos del monitoreo de la restauración, objetivos y ejemplos de indicadores y herramientas aplicables a cada uno

Nivel	Objetivos	Ejemplos de indicadores	Ejemplos de herramientas
Global	• Medir el progreso en relación con un índice global de cobertura terrestre recuperada. • Proporcionar un contexto internacional y establecer casos de éxitos y lecciones. • Balances globales de coberturas forestales, absorción de carbono, mejora de la biodiversidad, etc.	• N.º de hectáreas restauradas hacia el Objetivo de Desarrollo Sostenible 15.3, el desafío de Bonn, la New York Declaration on Forests (NYDF) y otros objetivos mundiales. • Balances de capturas/emisiones de carbono a nivel global, de regiones biogeográficas, grandes biomas, etc. (p. ej.: Martin <i>et al.</i>, 2013; Chazdon <i>et al.</i>, 2016; Poorter <i>et al.</i>, 2016; Schwartz <i>et al.</i>, 2020).	• Mapas generados a partir de imágenes de satélite de mediana y baja resolución con cubrimiento global y algoritmos de procesamiento automáticos. • Aproximaciones de estimaciones de área con muestreos globales y el uso de imágenes de satélite de alta resolución. • Recopilación de datos y proyectos en distintos países.
Nacional / subnacional / paisaje	• Medir el progreso hacia los objetivos o metas definidas por los países. • Proporcionar datos para la zonificación y planificación espacial de la restauración, planes de inversión, definición de políticas, ajuste de estrategias nacionales o subnacionales, etc., por parte de los tomadores de decisiones. • Mejorar los reportes nacionales frente a los compromisos globales: reportes derivados del Acuerdo de París frente al cambio climático, MRV de mecanismos REDD+, NDC, indicadores ODS, etc.	• Hectáreas con incremento de coberturas de bosque. • Evaluación de progresos y logros de las metas (positivos, neutrales o negativos) nacionales, subnacionales y regionales. • Carbono capturado y almacenado por ganancia de bosque y otras coberturas forestales.	Datos de área • Detección de cambios y generación de cartografía a partir de imágenes de satélite de mediana y alta resolución. • Estimaciones de área con muestreos probabilísticos nacionales y el uso de imágenes de satélite de alta resolución o datos de campo. • Registros administrativos y reportes de iniciativas implementadas en el territorio. Datos biológicos y socioeconómicos • Recopilación de inventarios forestales y parcelas de vegetación de distintas fuentes. • Mapas, censos y encuestas. • Monitoreo comunitario.



NIVEL NACIONAL

Nivel	Objetivos	Ejemplos de indicadores	Ejemplos de herramientas
Local y proyectos	Medir los avances dentro de los límites del proyecto en relación con los objetivos o metas planteados en la planificación del proyecto de restauración.	N.º de árboles plantados.	
	Proporcionar un contexto para la “intencionalidad” de la restauración y para el nivel de inversión.	- Tasas de supervivencia. - Abundancia de especies indicadoras. - Biomasa aérea por hectárea.	Protocolos para levantamientos de campo de la vegetación, muestreos de fauna, variables edáficas, etc.
	Incrementar los conocimientos científicos y mejores estrategias para la implementación.	- Contenidos de nutrientes en el suelo. - Distancia al fragmento de hábitat más cercano.	Datos de sensores remotos de alta y muy alta resolución, incluidas imágenes de drones para identificación de coberturas e individuos.
		Rendimiento de productos forestales no maderables.	Talleres y encuestas locales.

Fuente: modificado de Reyta et al. (2020).

Es así como las estimaciones del cambio en la dinámica del bosque con sensores remotos a menudo se adoptan como parte de las medidas del éxito de la restauración a nivel regional, nacional y global, permitiendo realizar un monitoreo espacialmente coherente y rentable del avance de las coberturas en restauración en tiempos relativamente cortos, facilitando el seguimiento histórico y actual de estas dinámicas para determinar las contribuciones y la persistencia (Bey et al., 2016; Decuyper et al., 2022; Sacande et al., 2021; McKenna et al., 2023;

Huettermann et al., 2023). Siguiendo las recomendaciones de buenas prácticas del IPCC para el reporte de datos de actividad de los cambios en las coberturas del bosque y las emisiones asociadas, además de generar la cartografía, es necesario incluir la estimación de las áreas a partir de muestreos estadísticos, como parte fundamental de los procesos de monitoreo y seguimiento, lo que permite conocer y reducir la incertidumbre asociada a los datos (Olofsson et al., 2013, 2014; FAO, 2016; Olofsson, 2018; GFOI, 2020; Ramírez y Morales, 2021).



Fotografía: Pantano de manglares de Cartagena, Colombia / Mariano Gaspar / www.shutterstock.com



MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE Y OTRAS COBERTURAS FORESTALES CON SENSORES REMOTOS

El seguimiento del bosque con sensores remotos, incluida la restauración, se basa principalmente en el análisis de cambios de coberturas (Ramírez y Morales, 2021; McKenna *et al.*, 2023). Sin embargo, dada la disponibilidad de un rango cada vez más amplio de tecnologías satelitales y aerotransportadas (sensores ópticos, radar, Lidar) que ofrecen resoluciones espaciales altas, existe un incremento gradual de la información directa o indirecta que es posible obtener de los datos de sensores remotos: p. ej., estructura de la vegetación, biomasa, productividad, fenología, salud de la vegetación, entre otros (Global Observation for Forest Cover and Land Dynamics [GOFC-GOLD], 2008; Cordell *et al.*, 2017; Harrison *et al.*, 2021; McKenna *et al.*, 2023). Es necesario señalar que, para el caso del protocolo, algunas de estas aplicaciones no cuentan con series de datos suficientemente robustas para realizar un monitoreo histórico y a largo plazo o suelen resultar altamente costosas o poco prácticas para los análisis a niveles nacionales y regionales (Liu *et al.*, 2019), si bien es posible incorporarlas a futuro o en otras escalas.

En el diseño metodológico del protocolo de monitoreo resulta clave seleccionar los insumos de sensores remotos y algoritmos de procesamiento adecuados, teniendo en cuenta que el seguimiento de las actividades de restauración del bosque y otras coberturas forestales demanda un enfoque diferente respecto al monitoreo de la deforestación,

dadas las características propias de los procesos de crecimiento de la vegetación:

1

Temporalidad: mientras que la deforestación ocurre de manera rápida y contundente, casi instantánea, la restauración es un proceso gradual y sutil, y por lo tanto requiere de un seguimiento de largo plazo (años) antes de que las intervenciones resulten en cambios positivos y se establezcan las coberturas arbóreas (Buckingham *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Stanturf *et al.*, 2019). Esta gradualidad en el proceso implica que el tiempo transcurrido desde la implementación determinará el nivel de ganancias respecto a la biodiversidad, estructura, funciones y cantidad de carbono almacenado en la biomasa (Guariguata y Ostertag, 2001; Martin *et al.*, 2013; Read y Lawrence, 2013; Lohbeck *et al.*, 2015), de tal forma que los bosques secundarios tropicales derivados de procesos de regeneración o restauración pueden tardar décadas en recuperar valores de biomasa y contenidos de carbono similares a los bosques maduros (Martin *et al.*, 2013; Chazdon *et al.*, 2016; Poorter *et al.*, 2016; Lefebvre *et al.*, 2021), característica que debe tenerse en cuenta al integrar al análisis los datos de biomasa para estimar el incremento en la absorción y almacenamiento del carbono.



NIVEL NACIONAL

En los procesos de restauración, la velocidad y, por tanto, la duración de la recuperación de la vegetación hasta llegar a un bosque secundario, es altamente variable (Norden *et al.*, 2015) y depende de una gran cantidad de condiciones, incluidas el uso o la cobertura de la tierra al inicio de la implementación, el grado del disturbio, la estrategia de restauración utilizada, las condiciones físicas y climáticas, la cercanía a ecosistemas naturales, etc. (Guariguata y Ostertag, 2001; Read y Lawrence, 2013; Lohbeck *et al.*, 2015; Meli *et al.*, 2017). Sin embargo, se ha determinado que los procesos de sucesión vegetal pueden presentar trayectorias impredecibles (Norden *et al.*, 2015), procesos determinantes en la recuperación del bosque, asociados a la restauración ecológica pasiva (natural o espontánea), y de acuerdo con las áreas recopiladas para Colombia entre 2007 y 2022, estos se han implementado en el 80 % de las áreas reportadas.

Por lo tanto, no es posible establecer intervalos de tiempo estáticos para identificar la ganancia de cobertura de bosque en las áreas reportadas con procesos de restauración, siendo necesario seleccionar insumos y metodologías que permitan hacer un seguimiento continuo de las iniciativas.

2

Persistencia de los resultados: otro de los aspectos que se debe tener en cuenta al diseñar una metodología de monitoreo de la restauración es la importancia de detectar no solo el crecimiento y establecimiento del bosque sino también su persistencia en el tiempo. Investigaciones sugieren que los bosques regenerados o restaurados en algunos países de América Latina tienen una alta probabilidad de ser talados posteriormente (Reid *et al.*, 2017, 2019; Schwartz *et al.*, 2020) y, en consecuencia, su contribución a la reducción de emisiones de GEI se revierte en el momento en que el carbono es liberado nuevamente a la atmósfera (Reid *et al.*, 2019; Schwartz *et al.*, 2017, 2020). De esta forma, no es posible alcanzar los objetivos de los compromisos nacionales de restauración del bosque si no se toman medidas

para garantizar la permanencia de los nuevos bosques a largo plazo (Schwartz *et al.*, 2020). Incorporar métodos para el seguimiento de la persistencia de las coberturas ganadas en las áreas con procesos de restauración permite evaluar las tendencias específicas del país, brindando herramientas para optimizar los resultados a largo plazo.

3

Retraso en la detección de los cambios: los métodos de detección del crecimiento de las coberturas de interés con datos de sensores remotos de mediana resolución, especialmente los provenientes de sensores ópticos (p. ej.: Landsat, Sentinel 2), requieren de un tamaño y densidad mínimos de la vegetación para que sea registrada por los instrumentos del satélite, y, por lo tanto, transcurre un lapso variable de tiempo entre la intervención efectuada y la identificación con estos insumos. Las imágenes de satélite de muy alta resolución permiten disminuir el tiempo de detección en las estrategias que incluyen el enriquecimiento de especies vegetales, ya que es posible observar las marcas de la siembra realizadas (Sacande *et al.*, 2021; Williams *et al.*, 2022).

Estas características propias de los procesos de restauración plantean cinco cuestiones principales en la selección de los insumos, métodos de procesamiento de datos de sensores remotos y el reporte de la ganancia de cobertura de bosque y otras coberturas forestales:

1

Algoritmos de procesamiento para generar los mapas de cambio de la restauración: resulta importante seleccionar el algoritmo de procesamiento adecuado que permita realizar un seguimiento continuo de las ganancias graduales de la cobertura de bosque en las áreas reportadas con procesos de restauración, incluso después del establecimiento de la cobertura forestal. La mayoría de los métodos de análisis



NIVEL NACIONAL

de series de tiempo de imágenes de satélite permiten observar las tendencias en los datos y relacionarlos con cambios continuos o discontinuos (Banskota *et al.*, 2014; Decuyper *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2017), por lo que resultan adecuados para identificar cambios graduales en las coberturas de bosque (Ye *et al.*, 2021). Se adopta este enfoque en el protocolo como parte del procesamiento de las imágenes para generar datos espacialmente explícitos de la dinámica de restauración del bosque.

2

Insumos de imágenes para generar los mapas de cambio de la restauración: acorde con el uso de algoritmos de series de tiempo, es necesario seleccionar insumos de sensores remotos que permitan realizar el monitoreo continuo de las áreas con procesos de restauración. Esta selección incluye la resolución espacial adecuada, la disponibilidad de datos en el periodo de interés y las características técnicas requeridas para implementar los algoritmos seleccionados.

3

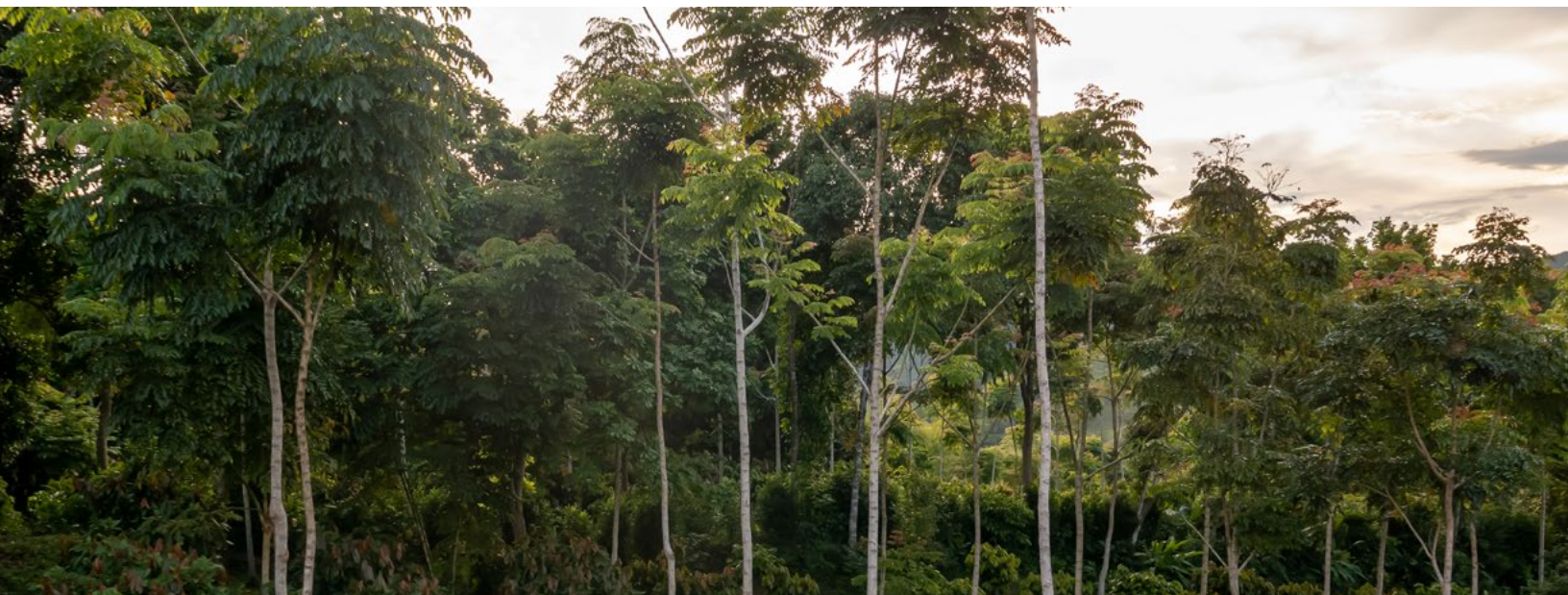
Cambios de coberturas identificados en el monitoreo de la restauración del bosque: en el proceso de restauración se parte de una cobertura inicial (suelo desnudo, cultivo, pasto, área minera, etc.) que gradualmente irá incrementando la presencia de vegetación arbustiva o leñosa antes de que se establezca el bosque. Por lo tanto, para identificar las áreas que presentan evidencia de procesos de restauración en curso, es necesario registrar la ganancia de vegetación leñosa que tiene lugar previamente a la aparición del bosque. Resulta deseable contar con imágenes de alta y muy alta resolución que faciliten discriminar las coberturas leñosas que potencialmente podrían llegar a convertirse en un bosque, de los cultivos arbustivos o plantaciones comerciales, así como detectar las evidencias de restauración en etapas tempranas de la implementación (Sancande *et al.*, 2021).

4

Validación de los resultados y reportes adecuados de las áreas en restauración estimadas: el uso de datos de sensores remotos permite generar cartografía completa y exhaustiva de una región (pared a pared), representando las características de interés presentes en el territorio, en este caso, la ganancia de coberturas en áreas reportadas con procesos de restauración. Sin embargo, en cada etapa del proceso cartográfico pueden ocurrir errores de distinta índole (toma de las imágenes, procesamiento, clasificación, interpretación, etc.), especialmente cuando estamos simplificando las características complejas y espacialmente continuas del territorio en categorías cartográficas discretas. La magnitud de los errores acumulados conlleva que cualquier intento de obtener el área de una categoría o clase específica dará como resultado una superficie errónea, ya que muy rara vez un mapa tendrá una exactitud del 100 % y, en consecuencia, no resulta adecuado reportar las áreas que arrojan directamente los mapas mediante un conteo de píxeles. Siguiendo las recomendaciones de buenas prácticas para el reporte de áreas, es necesario realizar un ajuste de los valores a partir de un muestreo probabilístico, aplicando un estimador insesgado a los datos de la muestra y cuantificando la incertidumbre asociada, representada en un intervalo de confianza (Olofsson *et al.*, 2014; Olofsson, 2018; GFOI. 2020).

5

Sostenibilidad: al igual que con cualquier otra estrategia de monitoreo de la restauración, el seguimiento con datos de sensores remotos requiere de la selección de herramientas, métodos y mediciones acordes con la escala de monitoreo, que sean sostenibles a mediano y largo plazo, y con resultados transparentes, oportunos y comparables en el tiempo (Buckingham *et al.*, 2019). Los tiempos que toma el proceso restaurativo hasta lograr consolidar las coberturas de bosque y el seguimiento de la persistencia de los resultados refuerzan la necesidad de un monitoreo sostenible en el largo plazo.



Fotografía: Quindío, Colombia / GATO / www.shutterstock.com

ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO CON SENSORES REMOTOS

Los métodos basados en la comparación de las imágenes de dos fechas que se suelen utilizar en la detección de la deforestación no resultan adecuados para el monitoreo de la restauración debido a que: 1) no es posible determinar un intervalo de tiempo único en el que se espera detectar la ganancia de la cobertura de bosque para seleccionar las fechas a comparar, 2) en las bases de datos disponibles no siempre se reporta la fecha en la que se inicia la implementación de las actividades de restauración, en algunos casos la fecha corresponde a la expedición de los actos administrativos o no coincide con lo observado en las imágenes, y 3) se pueden omitir las detección de ganancias de coberturas que posteriormente se pierden, cuando la pérdida ocurre en un tiempo inferior al comparado (Schwartz *et al.*, 2020).

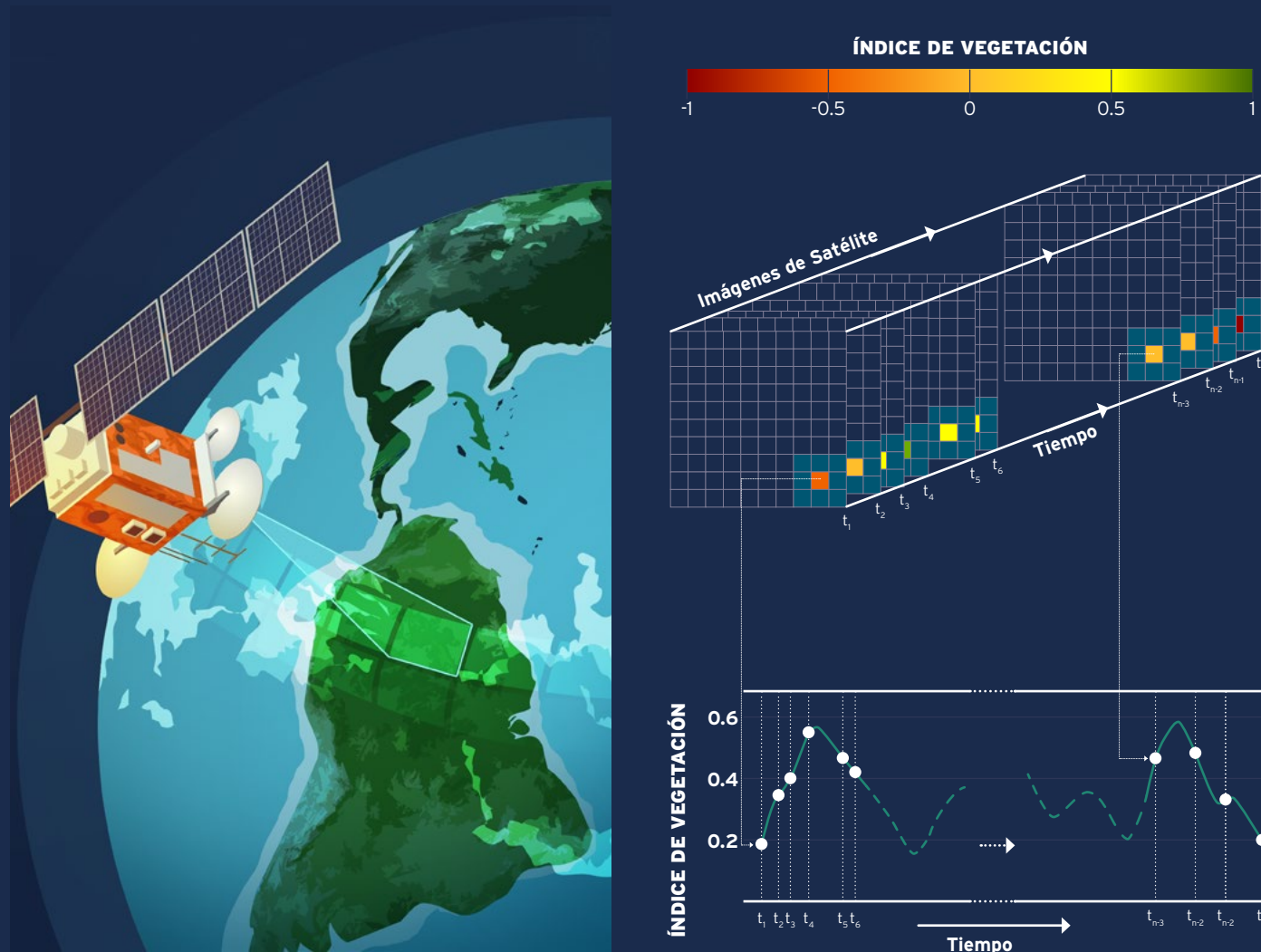
Por su parte, el análisis de series de tiempo de imágenes de satélite es uno de los enfoques más utilizados en las últimas décadas para la detección de los cambios graduales en las coberturas de bosque (Ye *et al.*, 2021), ya que permite detectar tendencias en los datos que se pueden asociar a

cambios continuos o discontinuos, tanto en sentido positivo (acumulación) como negativo (pérdida) (Banskota *et al.*, 2014; Decuyper *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2017), utilizando distintos algoritmos de procesamiento como VCT, TBDC, CCDC, LandTrendr, BFAST, CUSUM, etc. (Vogelmann *et al.*, 2012; Banskota *et al.*, 2014; Puhm *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2021), este enfoque es incluido en el protocolo como parte del procesamiento para generar los datos espacialmente explícitos de la dinámica de la restauración del bosque.

Se define la serie de tiempo como una colección de observaciones ordenadas a través del tiempo (Chatfield, 2003), en el caso de las imágenes satelitales estas observaciones corresponden a valores de reflectancia de las bandas espectrales o valores derivados, tales como los índices de vegetación (Ghaderpour y Vujadinovic, 2020). De esta forma, para cada píxel se tienen los datos de todas las imágenes multiespectrales disponibles en el intervalo de tiempo de la serie, como se puede observar en la figura 3.

Figura 3

Descripción gráfica de una serie de tiempo de datos provenientes de sensores remotos utilizando un índice de vegetación



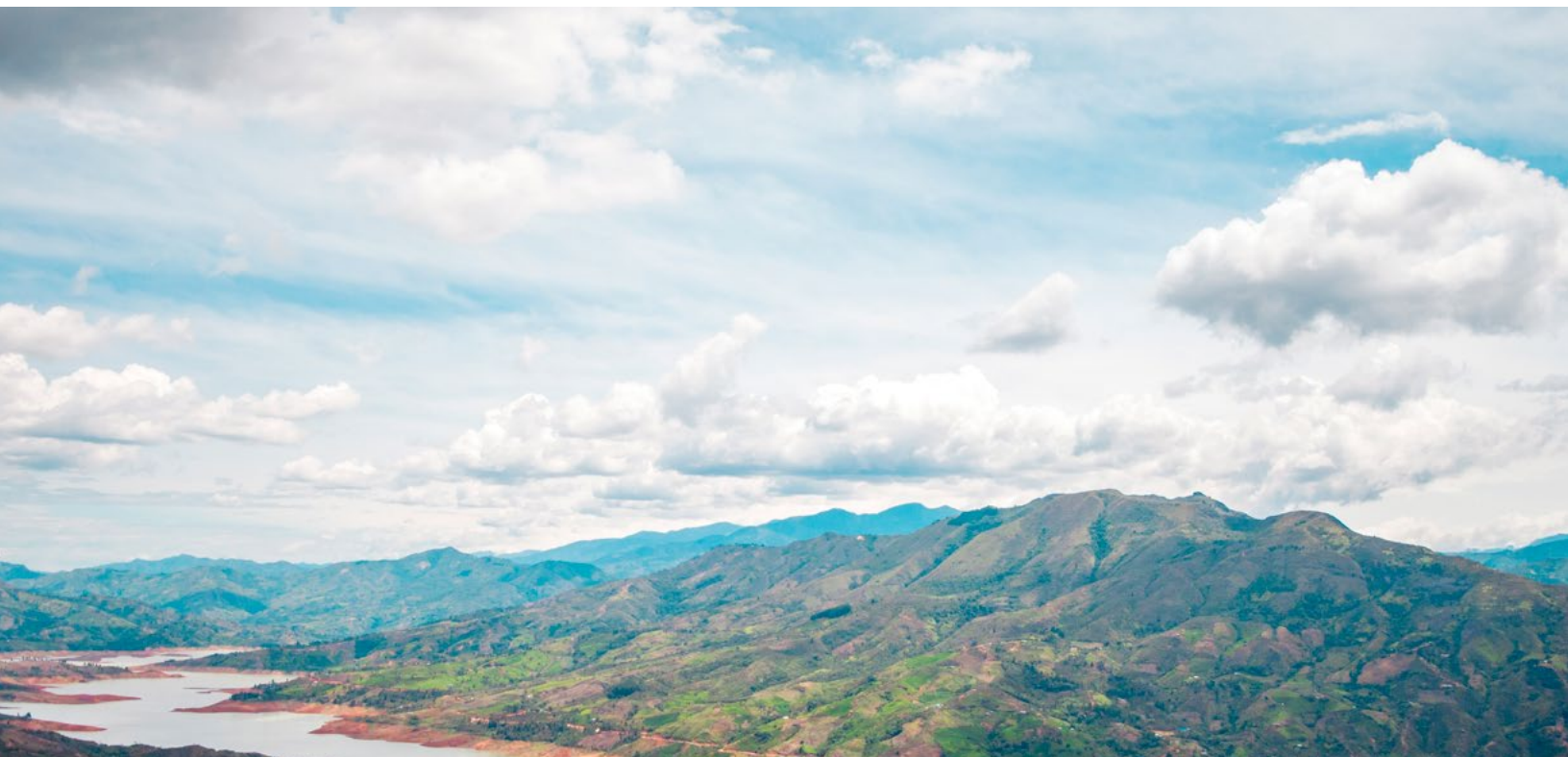
Fuente: adaptado de Ghaderpour y Vujadinovic (2020).

La construcción de series de tiempo con sensores remotos requiere de algunas características particulares y de un preprocesamiento adecuado para lograr la consistencia y comparabilidad entre las imágenes (Huang *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2015; Zhu, 2017; Qiu *et al.*, 2019):

- Contar con series de datos densas para el intervalo de análisis, esto es que se tenga una cantidad considerable de imágenes tomadas periódicamente a lo largo del año y de varios años.
- Alta integridad radiométrica y corrección atmosférica mediante la calibración y el ajuste preciso

de la reflectancia de la superficie, necesarios para obtener una caracterización más confiable de los cambios. Igualmente se recomienda la normalización relativa de las imágenes.

- Corrección geométrica y coregistro preciso de píxeles entre las imágenes para minimizar los cambios derivados de errores espaciales.
- La mayoría de las aplicaciones o algoritmos basados en series de tiempo requieren la detección y eliminación (enmascaramiento) de las nubes y sombras presentes en las imágenes.



Fotografía: Embalse de Suárez, Cauca, Colombia / Jhampier Giron M / www.shutterstock.com

Así mismo, existen algunos retos que pueden dificultar o afectar la detección adecuada de los cambios (Zhu, 2017; Puhm *et al.*, 2020):

- **Estacionalidad:** los patrones estacionales recurrentes por la variación de las condiciones climáticas a lo largo del año generan cambios en la fenología de las plantas o variación de las condiciones de iluminación debido a la topografía y al ángulo solar, sin que correspondan a cambios de coberturas.
- **Diferencias en el número de datos para el análisis:** los satélites con un esquema de adquisición a nadir suelen tener un ciclo de revisita constante con solapamiento en los bordes de cada pasada de órbita del sensor, por lo que al integrar las imágenes se obtiene una mayor cantidad de datos en las zonas de sobrelape. De otro lado, la presencia de nubes y sombras en las imágenes generan intervalos irregulares, al reducir la disponibilidad de datos para analizar la serie temporal.
- **Presencia de artefactos:** a pesar de que se utilicen algoritmos para eliminar las nubes y las

sombras, pueden quedar brumas, bordes de nubes y sombras aún sin enmascarar en las imágenes preprocesadas, incorporando ruido en las series de tiempo.

Es importante señalar que si bien este método presenta grandes ventajas para el monitoreo de los cambios en las coberturas de bosque, la detección de los cambios graduales sigue siendo más compleja y, por lo tanto, se requiere de un análisis más cuidadoso para seleccionar los datos, las variables y los algoritmos.

IMÁGENES DISPONIBLES PARA EL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Actualmente existen imágenes tomadas por algunos programas satélites, que permiten construir series de tiempo con las características mencionadas, provenientes principalmente de sensores ópticos (Banskota *et al.*, 2014), aunque se ha incrementado el uso de datos de radar en los últimos años. Con una resolución espacial media de 30 metros,



NIVEL NACIONAL

la información tomada por el programa Landsat configura el conjunto de datos de satélite más utilizado para el análisis de series temporales, ya que cuenta con un registro continuo de imágenes durante más de 30 años. En la actualidad, estos datos son puestos a disposición de los usuarios por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con las características técnicas necesarias para este tipo de estudios. Estos insumos han mostrado ser efectivos en la detección de cambios abruptos (deforestación) y su potencial para detectar perturbaciones graduales (Huang *et al.*, 2009; Decuyper *et al.*, 2022; Kennedy *et al.*, 2014; Zhu, 2017).

Desde 2016 se encuentran disponibles las imágenes ópticas del sensor Sentinel 2, con una resolución espacial de 10 metros (p. ej.: Puhm *et al.*, 2020; Hui *et al.*; 2021), y datos de alta resolución adquiridos por la constelación de satélites Planet Scope (p. ej.: Dagobert *et al.*, 2019; Keay *et al.*, 2022), que han sido incorporados recientemente en los análisis de series de tiempo.

A diferencia de los datos ópticos que capturan la energía reflejada por la superficie de la vegetación, los datos captados por los sensores de radar de apertura sintética (SAR) responden principalmente a la condición de humedad y a la estructura de la vegetación, tanto horizontal como vertical (densidad del dosel, textura, profundidad de la corona, tamaño de los troncos, ramas, hojas, etc.), rasgos que son captados según la polaridad con la que se toman los datos. La banda C o L determinará si se capta información principalmente de la superficie del dosel (banda C) o de estratos más bajos del bosque (banda L). Los SAR tienen la ventaja de permitir la toma de datos aún en presencia de nubes, si bien el preprocesamiento suele ser más complejo que el de las imágenes ópticas (KelIndorfer, 2019). Los principales datos disponibles actualmente para la construcción de las series de tiempo de imágenes de radar son tomados por los sensores Sentinel 1 (banda C) y Alos PalSAR 2 (banda L).

En la tabla 2 se sintetizan las características de las principales fuentes de datos de sensores ópticos y SAR para construir series de tiempo.

Tabla 2
Características de las principales imágenes de satélite ópticas y SAR de mediana y alta resolución disponibles en la actualidad para realizar análisis de series de tiempo

Tipo de sensor	Programa satelital	Resolución espacial	Resolución temporal (revisita)	Bandas espectrales / Polarizaciones	Años disponibles	Modo de toma (RADAR)
Sensores ópticos	Landsat.			Azul, verde, rojo, NIR, SWIR 1, SWIR 2, TIR.		
	5 TM.	30 m, 60 m y 100 m.	8 a 16 días (45 a 46 imágenes por año con L8 y L9).	Costa/Aerosoles, Cirrus y TIR2 (L8 y L9).	1984 a la fecha.	-
	7 ETM+.					
	8 y 9 OLI.			Pancromática de 15 m: (L7, L8 y L9).		
	Sentinel 2 A y B.	10 m, 20 m y 60 m.	5 días.	Azul, verde, rojo, límite del rojo (3), NIR, NIR angosto, SWIR 1, SWIR 2. Costa/Aerosoles, Cirrus, vapor de agua.	2015 a la fecha.	-
	Planet Scope.	~3 m.	Diaria.	Azul, verde, rojo, NIR.	2016 a la fecha.	-



NIVEL NACIONAL

Tipo de sensor	Programa satelital	Resolución espacial	Resolución temporal (revisita)	Bandas espectrales / Polarizaciones	Años disponibles	Modo de toma (RADAR)
Sensores SAR (radar de apertura sintética)	Sentinel 1 A y B	Principalmente.	6 días (con los dos satélites).	Banda C. $\lambda = 5,6$ cm.	2014 a la fecha.	Stripmap (SM).
		5x20 m.		Simple: HH o VV para todos los modos de toma.		Interferometric wide swath (IW).
		Existen otras resoluciones dependiendo de la polarización y el modo de toma.		Dual: HH+HV y VV+VH.		Extra wide swath (EW).
				No disponible para modo de toma Wave.		Wave (WV).
	Alos PalSAR 1	Simple: 10x10 m.	46 días.	Banda L. $\lambda = 24,6$ cm.	2006-2011.	Resolución fina.
		Dual: 20x10 m.		Pol Simple (HH or VV).		ScanSAR.
		Polarimétrica: 30x10 m.		Pol Dual (HH+VV o VV+VH).		Polarimétrico.
		ScanSAR: 100 m.		Pol Cuádruple (HH+HV+VH+VV).		
	Alos PalSAR 2	Spotlight: 1x3 m.	14 días.	Banda L. $\lambda = 24,6$ cm.	2014 a la fecha.	Spotlight.
		Stripmap: 3-10 m.		Pol Simple (HH, HV o VV).		Stitmap.
		ScanSAR: 25-100 m.		Pol Dual (HH+HV o VV+VH).		ScanSAR.
				Pol Cuádruple (HH+HV+VH+VV).		

NIR: infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta, TIR: infrarrojo térmico, H: horizontal, V: vertical.

Fuente: elaboración propia.

Luego de definir los insumos de sensores remotos es necesario seleccionar la(s) variable(s) adecuadas para el análisis de las series de tiempo. En el caso de las imágenes tomadas por sensores ópticos se pueden utilizar, entre otros, los valores de bandas espectrales (p. ej.: NIR, SWIR), índices derivados de los valores espectrales (p. ej.: NDVI, NDMI, NBR, NDWI), transformaciones de las imágenes como tasseled cap (humedad, verdor, brillo) o extracción de características a nivel del sub-píxel como en el análisis de mixtura espectral

para identificar vegetación verde, sombra, coberturas no fotosintéticas y suelo y el Normalized Difference Fraction Index (índice NDFI) (Banskota *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2017; Pasquarella *et al.*, 2022). Con las imágenes de SAR es posible utilizar los valores de retrodispersión, valores estadísticos (media, máximo, varianza, etc.), índices derivados de las polarizaciones (Kelldorfer, 2019; Ruiz-Ramos *et al.*, 2020) o extracción de características como la textura o índices de vegetación de radar.



ALGORITMOS PARA EL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Existe una gran cantidad de algoritmos o métodos de análisis de series de tiempo para la detección de cambios que pueden ser útiles en el seguimiento de la restauración, siendo los algoritmos de segmentación LandTrendr, CCDC y BFAST algunos de los más utilizados en el monitoreo del bosque, diseñados para detectar cambios abruptos y graduales de la vegetación (Zhu, 2017). Estos algoritmos generan, entre otros datos, valores que representan la magnitud de los cambios detectados, de forma que el usuario debe seleccionar los umbrales que permiten identificar los cambios de interés, selección que resulta crítica en la efectividad de la detección y que requiere de datos de campo o imágenes de alta resolución, así como de la habilidad del analista (Liu *et al.*, 2017).

Cada uno de estos algoritmos tiene ventajas y deficiencias en la detección de cambios del bosque y no existe un criterio único para determinar cuál es el más adecuado, siendo necesario evaluar su desempeño en el análisis de interés, en este caso la ganancia de coberturas leñosas y de bosque como evidencia de los procesos de restauración forestal. En la selección y parametrización del algoritmo es importante tener en cuenta el ecosistema o coberturas a monitorear, el proceso de interés, las condiciones de estacionalidad y los periodos con vacíos de información (Pasquarella *et al.*, 2022). Otro factor para tener en cuenta en un monitoreo nacional es el desempeño de las herramientas disponibles para implementar los algoritmos de manera óptima en áreas extensas.

A continuación, se describen brevemente cada uno de estos algoritmos y en la tabla 3 se comparan sus principales características.

1

LandTrendr (Landsat-based detection of trends in disturbance and recovery): es un algoritmo semiautomático que utiliza la segmentación tem-

poral para extraer información de cambios en las series de tiempo de Landsat. En el enfoque de LandTrendr se generan compuestos anuales a partir de múltiples imágenes, posteriormente, se extraen las trayectorias de cada píxel y se aplica un algoritmo en el que se modela la serie temporal como una secuencia de segmentos rectilíneos que captan las características generales de la serie. La estrategia general consiste en identificar un modelo de máxima complejidad de la trayectoria, que es simplificado iterativamente a partir de estadísticas de ajuste. Por último, se filtra y elimina el cambio que se considera ruido utilizando un umbral de magnitud del cambio a partir de los parámetros definidos por el usuario. El resultado es una trayectoria simplificada en la que es posible identificar puntos de ruptura o vértices de la trayectoria que separan los segmentos o periodos de cambio duradero o de estabilidad (figura 14c y figura 15c), estos puntos de ruptura son identificados por el año en el que se registra y el valor del índice espectral asociado (Kennedy *et al.*, 2010, 2018).

2

BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend)

Monitor: es un enfoque de monitoreo automático no supervisado para detectar cambios a partir del análisis de series de tiempo de sensores remotos. El método requiere definir dentro de la serie de tiempo el periodo histórico de referencia y el periodo de monitoreo. Los valores son modelados mediante regresiones armónicas, estimando los coeficientes de regresión de las observaciones históricas, los cuales son usados posteriormente para predecir los valores correspondientes al periodo de monitoreo. Los cambios se detectan como comportamientos anormales respecto a la serie histórica cuando el valor de la predicción es estadísticamente diferente del valor observado (Verbesselt *et al.*, 2012; Hamunyela *et al.*, 2020).



3

CCDC (Continuous Change Detection and Classification): es un algoritmo de detección de variaciones continuas capaz de detectar distintos tipos de cambios a medida que se incorporan nuevas imágenes. CCDC utiliza un modelo armónico para ajustar la serie temporal de cada píxel, minimizando las diferencias debidas a la variación estacional y aprovechando las diversas características espectrales de los datos en el intervalo de tiempo. Al igual que BFAST, requiere definir un periodo histórico y un pe-

riodo de monitoreo. Las nuevas observaciones del periodo de monitoreo se comparan con los valores predichos a partir del modelo histórico y si los datos observados se desvían más allá de un umbral establecido se detecta una ruptura (*break*). Posteriormente, los resultados del modelo se utilizan como entradas para la clasificación de las coberturas de la tierra utilizando un clasificador Random Forest. Aunque fue diseñado inicialmente para imágenes del programa satelital Landsat, se puede aplicar a series temporales de datos densas de cualquier sensor (Zhu y Woodcock, 2014; Qiu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022).

Tabla 3

Principales características de los algoritmos de segmentación de series de tiempo más utilizados (LandTrendr, CCDC y BFAST Monitor) y que se pueden implementar en la detección de la ganancia de coberturas asociadas a la restauración forestal

Características	LandTrendr	CCDC	BFAST Monitor
Datos usados para construir la serie de tiempo de cada píxel	Utiliza un valor representativo por año (o por un periodo definido por el usuario) derivado generalmente de un compuesto de medoides construido con todos los datos anuales. Se selecciona un valor con el objeto de minimizar la influencia de la variabilidad estacional antes de modelar las trayectorias de la serie temporal.	Tiene en cuenta los datos individuales de todas las observaciones válidas o limpias.	Tiene en cuenta los datos individuales de todas las observaciones válidas o limpias.
	Requiere seleccionar cuidadosamente el periodo para la construcción del compuesto según las condiciones del área de interés (estacionalidad, periodos de crecimiento de la vegetación, persistencia de nubes, etc.).		

NIVEL NACIONAL

Características	LandTrendr	CCDC	BFAST Monitor
Enfoque del algoritmo	Algoritmo de segmentación de la serie de tiempo.	Algoritmo de segmentación de la serie de tiempo.	El algoritmo utiliza un método de límite estadístico.
	Interpreta las series temporales de los datos anuales como trayectorias continuas formadas por "segmentos" y "vértices". Cada vértice representa el inicio y final de un segmento (trayectoria entre vértices) y puede ser clasificado como un periodo estable.	Utiliza modelos de regresión armónica lineal (seno - coseno) para captar los patrones estacionales intraanuales de cada píxel, lo que elimina la necesidad de generar previamente compuestos, a la vez que proporciona un conjunto más amplio de coeficientes para la clasificación de los segmentos.	La versión original está pensada para el análisis de series temporales históricas, si bien la versión BFAST Monitor está mejorado para la detección de cambios recientes.
	LandTrendr ajusta segmentos de tendencia lineal a la serie de tiempo espectral de cada píxel, filtrando el ruido y derivando tendencias generalizadas. Los segmentos resultantes pueden caracterizarse en términos de dirección del cambio (estable, pérdida o ganancia) y clasificarse según la magnitud y duración del cambio.	La serie es ajustada mediante un modelo discontinuo de partes, formada por segmentos independientes y "rupturas" (breaks), que corresponden a la detección de un cambio discreto representado como un salto en la trayectoria temporal. CCDC identifica los puntos de ruptura en el momento en que un número de observaciones se desvían de los valores predichos por los datos históricos.	Utiliza modelos de regresión armónica lineal para captar los patrones estacionales intraanuales de cada píxel; de forma que los periodos de estabilidad de la cobertura se modelan como una función continua y determinista del tiempo. El modelo estacional representa una media de las distintas condiciones que se dan dentro de un periodo estable.
	Requiere de la definición de umbrales para determinar los cambios.	El algoritmo asume una relación lineal entre el tiempo y la respuesta espectral, por lo que los segmentos pueden caracterizarse en términos de la dirección del cambio (estable, pérdida o ganancia).	El algoritmo descompone las series temporales en componentes de tendencia, estacionales y de ruido, lo que permite detectar cambios bruscos y graduales.
		El diseño inicial se ha ampliado para incluir el análisis de varios tipos de coberturas y la incorporación de clasificadores (Random Forest) para generar mapas de coberturas de un periodo dado.	En la serie de tiempo se debe definir el periodo histórico y el de monitoreo, los cambios se detectan como comportamientos anormales cuando el valor esperado a partir del modelo histórico es estadísticamente diferente del valor observado.
		Requiere de la definición de umbrales para determinar los cambios.	No requiere de la definición de umbrales.

N.º de variables

Univariado

Multivariado

Univariado

NIVEL NACIONAL

Características	LandTrendr	CCDC	BFAST Monitor
Enfoque para detectar los cambios a partir de la serie de tiempo	Fuera de línea (<i>offline</i>): se utiliza la serie completa para identificar los cambios, determinando el número óptimo de segmentos y vértices. El usuario debe especificar el número máximo de segmentos que utilizarán en el ajuste del modelo.	En línea (<i>online</i>): permite detectar los cambios en la medida en que se adicionan nuevas observaciones. Para determinar la ubicación de las rupturas (<i>breaks</i>) se analizan las observaciones de forma iterativa y retrospectiva. Como resultado, el modelo es sensible a los valores del inicio del periodo de ajuste.	En línea (<i>online</i>): permite detectar los cambios en la medida en que se adicionan nuevas observaciones.
Tipo de cambios detectados	Detección de cambios abruptos y graduales.	Detección de cambios abruptos y graduales.	Detección de cambios abruptos y graduales.
Escala temporal de la detección	Los cambios se asocian a un año (o periodo de tiempo definido por el usuario). Útil para análisis periódicos.	Los cambios pueden asociarse a una fecha de adquisición concreta. Se puede utilizar para la detección de cambios en tiempo real.	Los cambios pueden asociarse a una fecha de adquisición concreta. Se puede utilizar para la detección de cambios en tiempo real.
Ventajas / Desventajas	Produce siempre trayectorias continuas. Al crear un compuesto de imágenes para cada periodo de la serie se reduce el ruido de las nubes y las sombras y la ausencia de datos en la serie. Debido a que el modelo asume una relación lineal simple entre el tiempo y la reflectancia, los cambios con tasas variables pueden ser más difíciles de detectar apropiadamente. Las fechas de inicio y final de la serie temporal puede afectar el ajuste de la trayectoria y la sincronización de los vértices, por lo que es necesario tener cuidado en la definición del intervalo y las detecciones en los extremos de la serie temporal.	En píxeles en el que el número de observaciones es reducido (p. ej.: por nubes), el ajuste del modelo armónico puede ser inestable, mostrando una tendencia a encontrar rupturas después de estos periodos, detectando falsos cambios. Puede ser útil eliminar los periodos completos que tienen pocos datos (se recomiendan al menos 7 valores por año). Debido a que el modelo asume una relación lineal simple entre el tiempo y la reflectancia, cambios con tasas variables pueden ser más difíciles de detectar apropiadamente. Un número irregular de observaciones afecta el uso de modelos de regresión armónica y la densidad de cambios detectados, por lo tanto, es recomendable ajustar los bordes de solapamiento entre las escenas vecinas o en periodos donde hay mayor densidad de imágenes (p. ej.: por funcionamiento de dos satélites), especialmente para análisis de regiones amplias.	Puede analizar series de tiempo con vacíos en los datos (p. ej.: nubes enmascaradas) sin requerir de técnicas para rellenar o completar estos huecos; sin embargo, datos sucesivos con ruido (p. ej.: píxeles con nubes consecutivos no eliminados de las imágenes) pueden ser una fuente de error. La naturaleza determinista del modelo no permite variaciones interanuales del patrón estacional (variaciones entre años diferentes, por ejemplo, cambios en la estacionalidad).



NIVEL NACIONAL

Características	LandTrendr	CCDC	BFAST Monitor
Disponibilidad para la implementación en la nube	Disponible para procesamiento en Google Earth Engine (GEE): https://github.com/eMapR/LT-GEE Disponible en la plataforma del Sistema de acceso de datos de observación de la tierra, procesamiento y análisis para la vigilancia de la superficie terrestre (SEPAL) (FAO) para áreas locales o regionales: https://sepal.io/	Disponible para procesamiento en GEE: https://github.com/GERSL/CCDC https://gee-ccdc-tools.readthedocs.io/en/latest/background.html Disponible en la plataforma SEPAL (FAO) para áreas locales o regionales: https://sepal.io/	Disponible para procesamiento en GEE: https://github.com/BFAST2/geeBFAST-Monitor Disponible en la plataforma SEPAL (FAO) para áreas locales o regionales: https://sepal.io/

Fuente: elaboración propia con base en Verbesselt *et al.* (2012), Kennedy *et al.* (2018), Zhu (2017), Bullock *et al.* (2020), Hamunyela *et al.* (2020), Arévalo *et al.* (2020a) y Pasquarella *et al.* (2022).



Fotografía: Uramba en Bahía Málaga, Buenaventura / Jhampier Giron M / www.shutterstock.com

DEFINICIONES ADOPTADAS PARA EL DISEÑO DEL PROTOCOLO

Para el diseño, la implementación y el monitoreo de los procesos en el contexto de la restauración de ecosistemas, en particular en la del bosque, es necesario estandarizar y adoptar un marco teórico, conceptos y términos comunes (SER, 2004; Gann *et al.*, 2019; Ramírez y Morales, 2021), evitando generar confusión entre los actores involucrados en el proceso, incluida la comunidad, los técnicos, los tomadores de decisiones, los implementadores de políticas, los gestores, etc. (Hanson *et al.*, 2015; Murcia *et al.*, 2017; Gann *et al.*, 2019).

Teniendo en cuenta que el monitoreo de la restauración de ecosistemas forestales propuesto en el protocolo se articula con el monitoreo de la superficie de bosque realizado desde 2013 por el SMByC del Ideam, se utiliza la definición de bosque natural adoptada por el país para generar las estadísticas e indicadores nacionales y el reporte del cumplimiento de los compromisos globales frente al cambio climático y la reducción de emisiones por deforestación y degradación REDD+. Así mismo, se incluye una definición de vegetación leñosa para identificar las ganancias que tienen lugar en las etapas tempranas de la restauración forestal:



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 metros al momento de su identificación, y un área mínima de 1 hectárea. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria. Esta definición es consecuente con los criterios definidos por la CMNUCC en su Decisión 11/COP 7 (Galindo *et al.*, 2014; Ideam, 2019).



Vegetación leñosa y otras tierras forestales:

La definición de vegetación leñosa que utiliza el SMByC se refiere a la 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 y 5 metros al momento de su identificación y su extensión mínima es de 0,5 hectáreas.

NIVEL NACIONAL

En el caso del monitoreo de la restauración del bosque, la vegetación leñosa de interés es aquella que potencialmente podría llegar a convertirse en bosque, por lo que se utiliza la definición anterior, sacando del análisis a los arbustos y árboles sembrados para la producción agropecuaria y las plantaciones forestales comerciales. Así mismo, la extensión mínima sigue las directrices establecidas en este protocolo, es decir, las áreas iguales o superiores a 1 hectárea y áreas entre 0,5 y 1 hectárea que tengan continuidad con otras áreas en restauración potencial a bosque o superficies de bosque existentes.

En cuanto al monitoreo **de las otras coberturas forestales**, se realizaría el seguimiento a las tierras

forestales que nunca llegarán a ser bosque natural, incluidas las coberturas arbóreas de sistemas agroforestales, silvopastoriles, cercas vivas, barreras cortavientos y revegetalizaciones. Los principios y metodologías del protocolo pueden aplicarse para el seguimiento de otras coberturas forestales asociadas a la restauración.

Así mismo, se adoptan los enfoques y definiciones de las actividades de restauración incluidos en el PNR (Minambiente, 2015) que son utilizados para el reporte de las áreas de restauración en los aplicativos de los proyectos de restauración de Minambiente y el módulo de restauración del SNIF:



Restauración ecológica

Actividad para restablecer el ecosistema degradado a una condición similar al ecosistema predisturbio respecto a su composición, estructura y funcionamiento. Además, el ecosistema resultante debe ser un sistema autosostenible y debe garantizar la conservación de especies, del ecosistema en general, así como de la mayoría de sus bienes y servicios. El objetivo de la restauración ecológica es iniciar o acelerar procesos de restablecimiento de un área degradada, dañada o destruida en relación con su función, estructura y composición.



Rehabilitación

Actividad que permite llevar el sistema degradado a un sistema similar o no al sistema predisturbio, que debe ser autosostenible, preservar algunas especies y prestar algunos servicios ecosistémicos. El objetivo de esta intervención, por lo tanto, es reparar la productividad o los servicios del ecosistema en relación con los atributos funcionales o estructurales.



Recuperación

Actividades que permiten recuperar algunos servicios ecosistémicos de interés social. Generalmente los ecosistemas resultantes no son autosostenibles y no se parecen al sistema predisturbio. El objetivo de este tipo de acciones o intervenciones es retornar la utilidad del ecosistema para la prestación de servicios ambientales diferentes a los del ecosistema original, integrándolo ecológica y paisajísticamente a su entorno.



Estrategias de restauración

El aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y la plataforma del SNIF definieron las estrategias asociadas a cada uno de los tres enfoques para reportar las áreas con procesos de restauración (figura 4). Exceptuando la restauración ecológica pasiva (natural o espontánea) y activa (asistida), no se han adoptado definiciones estandarizadas para las demás estrategias. A manera de guía, en el marco del protocolo se recopilan algunas definiciones asociadas, dando prioridad a las incluidas en las políticas y la normativa nacional (anexo 1), si bien es recomendable adoptar una terminología que facilite y mejore el reporte de las áreas por parte de los usuarios, de forma que se establezca un lenguaje común entre usuarios expertos y no expertos y se mejore la calidad de los datos recopilados, incrementando el alcance de los análisis derivados.

Es claro que no todas las estrategias establecidas tienen como finalidad la recuperación del bosque, mientras que otras podrían o no incluir áreas de

restauración de coberturas de bosque, de acuerdo con la definición utilizada, como se puede ver en la figura 4:

Figura 4
Estrategias definidas en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF para cada uno de los tres enfoques incluidos en el PNR

ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN POR ENFOQUE

(Aplicativo Minambiente - SNIF)

RECUPERACIÓN O RECLAMACIÓN		REHABILITACIÓN		RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
Remediación	✗	Cercas vivas / Barreras	✗	Activa o asistida (enriquecimientos, manejo de regeneración natural) ✓
		Sistemas agroforestales	✗	
Fitoremediación	✗	Corredor biológico		
		P.F. Protectoras	—	Pasiva o espontánea (aislamientos) ✓
Revegetalización	—	P.F. Protect productoras	—	
		Manejo forestal sostenible	✱	
Obras biomecánicas	✗	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 se marcan con el símbolo (✓), las que eventualmente podrían o no derivar en cobertura forestal se marcan 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.

Fuente: elaboración propia.



Fotografía: paisaje en el eje del café Colombia / Analía / www.shutterstock.com

Finalmente, para el caso particular del monitoreo de la restauración del bosque con sensores remotos y teniendo en cuenta los alcances de los insumos, se establecen las siguientes definiciones:



Restauración de la cobertura de bosque natural

Restablecimiento o ganancia de la superficie de cobertura de bosque¹⁴ dentro de las áreas destinadas y reportadas para tal fin¹⁵, en sitios que presentan otro tipo de coberturas diferentes al bosque natural al momento de implementar las actividades de restauración.



Ganancia de cobertura de vegetación leñosa (que potencialmente puede llegar a convertirse en bosque):

Hace referencia a la 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 al momento de implementar las actividades de restauración, y que no corresponden a árboles o arbustos para la producción agropecuaria o plantaciones comerciales.

14. De acuerdo con la definición de bosque natural adoptada por el país para generar las estadística e indicadores nacionales y el reporte del cumplimiento de los compromisos globales.

15. Se refiere a las áreas incluidas en los repositorios del SNIF, al aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del Sistema Ágil de ANLA y otros reportes adicionales de entidades públicas y privadas.



METODOLOGÍA

DISEÑO METODOLÓGICO

Pág 57.

**CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL
REPORTE DE LAS ÁREAS CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN**

Pág 105.



DISEÑO METODOLÓGICO

LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE CON SENSORES REMOTOS

Acorde con los objetivos, el alcance y las herramientas disponibles, se establecen los lineamientos que definen el diseño metodológico del protocolo:



1

Teniendo en cuenta la intencionalidad y el desarrollo de actividades como una característica básica del proceso de restauración (FAO, 2020; IPBES, 2018; Murcia y Guariguata, 2014; SER, 2004; Stanturf *et al.*, 2019), el proceso de monitoreo se realiza dentro de las áreas delimitadas y establecidas formalmente para ese fin, reportadas por los actores y entidades que las implementan.



2

Se monitorean las áreas reportadas con actividades de restauración en las que potencialmente se pueda llegar a reestablecer coberturas de bosque de acuerdo con la definición adoptada por Colombia. No todas las estrategias incluidas en los aplicativos conllevan la restauración del bosque, por lo que es necesario seleccionar aquellas que cumplen con el objetivo del monitoreo.



3

El diseño metodológico del protocolo está enfocado en la detección de ganancia (y de eventual pérdida) de la cobertura de bosque o la vegetación leñosa que potencialmente pueden llegar a convertirse en bosque.



4

Si bien el protocolo fue diseñado y probado para el monitoreo de la restauración del bosque, la metodología puede aplicarse en áreas con estrategias de restauración que involucren el establecimiento de otras coberturas forestales o arbóreas (cerchas vivas, barreras cortavientos, revegetalización, agroforestales, silvopastoriles), teniendo en cuenta que estas coberturas presentan múltiples beneficios en el contexto de paisaje, el bienestar de las comunidades y los servicios ecosistémicos, incluido el almacenamiento de carbono.



5

Acorde con la definición de bosque adoptada, se monitorean las áreas iguales o superiores a 1 hectárea y áreas entre 0,5 y 1 hectárea que tengan continuidad con otras áreas en restauración potencial a bosque o superficies de bosque existentes.



6

La metodología del protocolo está enfocada en la detección de ganancias de coberturas asociadas a la restauración forestal mediante el uso de datos de sensores remotos de manera articulada con el seguimiento de la superficie y el cambio de la superficie de bosque realizado por SMByC. Se utiliza el potencial de la teledetección para realizar un monitoreo espacialmente coherente en áreas geográficas extensas (nivel nacional), en tiempos relativamente cortos y con la posibilidad de mantener el seguimiento a mediano y largo plazo para evaluar la persistencia de los resultados.



7 |

Se realiza un monitoreo acumulado de las áreas con procesos de restauración, de forma que en cada periodo se evalúan las áreas recopiladas anteriormente junto con los nuevos proyectos reportados. En cada periodo se detectan las coberturas de bosque y vegetación leñosa en crecimiento y la persistencia de las coberturas ganadas en años anteriores.



8 |

Para la detección de la ganancia de cobertura de vegetación leñosa que podría llegar a convertirse en bosque y la ganancia de bosque se emplean métodos de análisis de series de tiempo densas, teniendo en cuenta que los procesos de restauración son graduales, de temporalidad variable y no siempre se cuenta con la fecha o año exacto de la implementación.



9 |

Para el cálculo de los indicadores de la restauración de la cobertura del bosque se utilizan las áreas estimadas a partir de un muestreo estadístico. No se reportan las áreas derivadas directamente del conteo de píxeles del mapa.



10 |

En la implementación de la metodología se dará prioridad a las herramientas de *software* libre que permiten la personalización y el ajuste de acuerdo con los requerimientos particulares y que favorecen la sostenibilidad del monitoreo, incluidas las aplicaciones desarrolladas y utilizadas en el SMBYC.

La implementación del protocolo para el monitoreo de las áreas con procesos de restauración potencial del bosque se realiza en cuatro etapas principales (figura 5):

Figura 5

Etapas de la implementación del protocolo de monitoreo de las áreas con procesos de restauración potencial del bosque



Fuente: elaboración propia.



ETAPA 1

RECOPILACIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LAS ÁREAS REPORTADAS CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN

FUENTES DE INFORMACIÓN

El monitoreo de las áreas con procesos de restauración del bosque depende en gran medida de la completitud, oportunidad y calidad de la información disponible. En este sentido parte de las acciones requeridas para garantizar la operatividad y el éxito en la implementación del protocolo incluye la mejora de los mecanismos de recolección, reporte y disposición de las iniciativas y proyectos en curso. Si bien la investigación e implementación de proyectos de restauración ha tenido un auge considerable en las últimas décadas, la información de las iniciativas históricas se encuentra dispersa y no

siempre se cuenta con información geográfica de las intervenciones. En el proceso de recopilación de las áreas para el diseño del protocolo de monitoreo se encontraron pocos registros con información espacializada antes de 2007.

Actualmente existen dos fuentes principales que recopilan información de las áreas implementadas: el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y el módulo de plantaciones forestales protectoras/restauración del SNIF del Ideam. Adicionalmente, se puede consultar el Sistema Ágil de ANLA y otras fuentes de información que se encuentran dispersas en las entidades que no reportan en estas plataformas. Estas fuentes de información se describen en la tabla 4:





NIVEL NACIONAL

Tabla 4

Fuentes de información para recopilar las áreas con procesos de restauración

FUENTE/PLATAFORMA DE REPORTE	INFORMACIÓN RECOPIADA	ENTIDADES QUE REPORTAN EN EL SISTEMA
Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) (Ideam)	Plantaciones forestales protectoras antes de 2020. Desde 2020 recopila las áreas en restauración, con la misma estructura de información que el aplicativo de proyectos de restauración Minambiente.	Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).
	El reporte en la plataforma es de carácter obligatorio.	
Aplicativo de proyectos de restauración (Minambiente)	Áreas con procesos de restauración.	Institutos de investigación, Parques Nacionales Naturales, ONG, academia, organizaciones civiles y particulares, alcaldías, gobernaciones, etc.
	El reporte de la información no es obligatorio.	
	Se implementó en 2019.	
Sistema Ágil (ANLA)	Áreas y actividades de compensación de la biodiversidad e inversión ambiental del 1 %.	Entidades que solicitan licenciamiento ambiental.
	La información se registra con una estructura definida y normativizada para el licenciamiento ambiental. La información específica de plantaciones forestales protectoras y restauración es reportada posteriormente en el SNIF.	
	Se registran todas las actividades estipuladas para licenciamiento ambiental, por lo que es necesario filtrar la información correspondiente a la restauración. El reporte es de carácter obligatorio por parte de las empresas.	
Otras fuentes de información	Otras iniciativas que no se encuentran en los aplicativos anteriores.	

Fuente: elaboración propia.



ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En el monitoreo propuesto se incluyen únicamente reportes de iniciativas de restauración que cuenten con información georreferenciada y representada con geometría de polígono. No se incluyen reportes con geometría de punto o línea, ni reportes exclusivamente alfanuméricos, ya que el monitoreo está diseñado para reportar superficies y no siempre es posible reconstruir el polígono del área implementada.

La información disponible debe ser revisada, ajustada y filtrada antes de consolidar la base de datos espacial que se utilizará para el monitoreo, especialmente cuando se obtiene de fuentes distintas a los aplicativos de Minambiente y del SNIF. Una vez recopilada la información para el periodo de interés se realiza un diagnóstico o curaduría, estandarizando, ajustando y filtrando la información recibida e identificando inconsistencias y posibles errores que podrían influir en la calidad de los resultados. En este proceso se recomienda implementar al menos 4 pasos básicos, que se describen en la figura 6:

Figura 6

Pasos mínimos para la revisión y el ajuste de la información que se incorpora en la base de datos geográfica de las áreas con procesos de restauración



Fuente: elaboración propia.



NIVEL NACIONAL

1

Verificar sistema de proyección: estandarizar la información al sistema de proyección cartográfico oficial de Colombia EPSG: 9377.

2

Estandarizar y ajustar los atributos establecidos en la base de datos: se incluyen todos los atributos y dominios del aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF. Si la información proviene de bases geográficas distintas se deben estandarizar los atributos y los dominios (anexo 2). Preferiblemente, la información reportada y recopilada debe contar con los siguientes atributos mínimos:

- **Información del proyecto.**
- **Fecha de implementación:** inicio de las actividades de restauración.
- **Duración proyectada:** para la implementación y seguimiento de las actividades de restauración y el monitoreo. Este campo resulta de utilidad para el monitoreo de la permanencia de los resultados.
- **Enfoque de restauración:** restauración ecológica, rehabilitación o recuperación.
- **Estrategia de restauración:** se utilizan las estrategias incluidas en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y del SNIF (figura 4).
- **Especies utilizadas:** facilita identificar el tipo de ecosistema que se está restaurando.

Adicionalmente, se recomienda incluir en los aplicativos de reporte de las iniciativas al menos dos atributos que facilitan identificar las áreas con procesos de restauración potencial a bosque de la restauración de otros ecosistemas y coberturas:

- Ecosistema o cobertura objetivo a la que se quiere llegar con las actividades de restauración (bosque natural, otras plantaciones, humedal, páramo, sabana o pastizales naturales, agroecosistema, etc.).

- Estado del proyecto: si el área reportada es preliminar, por ejecutar, en ejecución o finalizada. En el caso de la información de la ANLA, existen reportes de áreas preliminares o en evaluación, que corresponden a las zonas propuestas para realizar las actividades de compensación/inversión, pero que no necesariamente son las áreas específicas en las que finalmente se implementan las actividades y, por tanto, deberán ser revisadas antes de incorporarse a la base de datos.

En el proceso de recopilación de las áreas para el diseño del protocolo y para el monitoreo de la línea base se encontró que la información disponible no siempre cuenta con estos datos mínimos, por ejemplo, en algunas de las áreas no se registró la fecha de inicio de la implementación, mientras que en otros casos la fecha suministrada no corresponde con lo observado en las imágenes (p. ej.: evidencias de restauración anteriores a la fecha indicada). La fecha de la implementación es uno de los datos básicos que permite mejorar el monitoreo.

Así mismo, no siempre se reporta el enfoque y las estrategias implementadas o las estrategias registradas no coinciden con lo observado en las imágenes o las especies reportadas. En la última sección se incluyen algunas recomendaciones y sugerencias derivadas de las consultas con las entidades y el trabajo realizado para el diseño del protocolo.

3

Revisión y ajuste topológico: para calcular la superficie total de las áreas con procesos de restauración potencial a bosque y facilitar el análisis espacial de los datos se recomienda revisar y ajustar la topología de los polígonos recopilados, al menos en los siguientes aspectos:

- **Polígonos bien cerrados.**
- **Polígonos duplicados:** puede ocurrir por errores al cargar la información en los aplicativos o cuando se recopila información de distintas fuentes. Si son idénticos y corresponden al mismo proyecto se recomienda dejar el polígono que se haya reportado en alguno de los aplicati-

NIVEL NACIONAL

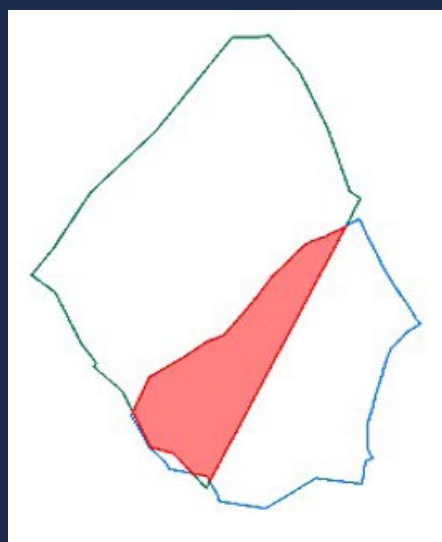
vos oficiales (Minambiente o SNIF), si este no es el caso, se deja el polígono que incluya la información más completa.

- **Polígonos superpuestos:** estos casos deben evaluarse de manera individual. Generalmente corresponden a traslapes entre polígonos vecinos y pueden resolverse con las herramientas de ajuste topológico disponibles en los programas de sistemas de información geográfica (SIG). En otros casos son áreas comunes que fueron reportadas por dos proyectos distintos (figura 7a), en cuyo caso se recomienda asignar el área superpuesta al proyecto con fecha de implementación más antigua y observar con las imágenes de satélite si es posible determinar en cuál de los dos proyectos se realiza la implementación.

- **Polígonos de bucles o slivers:** la digitalización puede generar líneas adicionales que forman polígonos externos diminutos y que en la base de datos se contabilizan como polígonos independientes (figura 7b). Se sugiere eliminar estos polígonos.
- **Desplazamientos:** en algunos casos la información puede tener problemas de proyección desde la fuente original y se observa un desplazamiento sistemático de los polígonos respecto a las imágenes de satélite (figura 7c). Estos desplazamientos deben ser ajustados moviendo el polígono a la posición correcta, teniendo precaución de utilizar imágenes con una corrección geométrica adecuada.

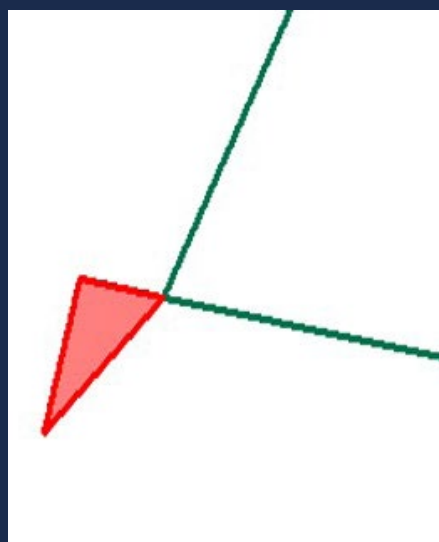
Figura 7

Ejemplos de errores topológicos en los polígonos recopilados que se recomienda revisar antes de incluirlos en la base de datos para el monitoreo



A

Ejemplo de sobrelape entre las áreas (polígonos) reportados.



B

Bucles o *slivers* resultantes de la digitalización.



C

Desplazamiento (el polígono original (azul) se ajustó (rojo), una vez verificado el desplazamiento con las imágenes.

Fuente: elaboración propia con base en una imagen de Google Earth.



4

Filtro de la información para consolidar la base de datos geográfica de las áreas para el monitoreo: acorde con el objetivo, los alcances y los lineamientos metodológicos, el protocolo fue diseñado y probado para el monitoreo de las áreas de restauración del bosque, de acuerdo con la

definición adoptada por Colombia. Sin embargo, existen otras estrategias, ecosistemas o coberturas que pueden ser monitoreadas para estimar los datos de actividad asociadas. Se recomienda filtrar y almacenar la información recopilada en cuatro bases de datos espaciales, tres de las cuales están asociadas a coberturas de bosque y otras coberturas forestales.

Base de datos



Base de datos de las áreas con procesos de restauración potencial a bosque:

Corresponde a las áreas en los que potencialmente se puede llegar a establecer una cobertura de bosque de acuerdo con la definición adoptada por el país. **El protocolo está diseñado para ser implementado en el monitoreo de estas áreas.**



Base de datos de las áreas reportadas con procesos de restauración de otras coberturas forestales:

Corresponde a las áreas en los que potencialmente se puede llegar a establecer otras coberturas forestales distintas al bosque, y que son de interés para las estimaciones de emisiones/absorciones de carbono en el contexto del cambio climático, junto con los demás servicios ecosistémicos que prestan y su importancia desde el enfoque del paisaje. **Los principios y métodos básicos incluidos en el protocolo pueden aplicarse al monitoreo de estas áreas.**



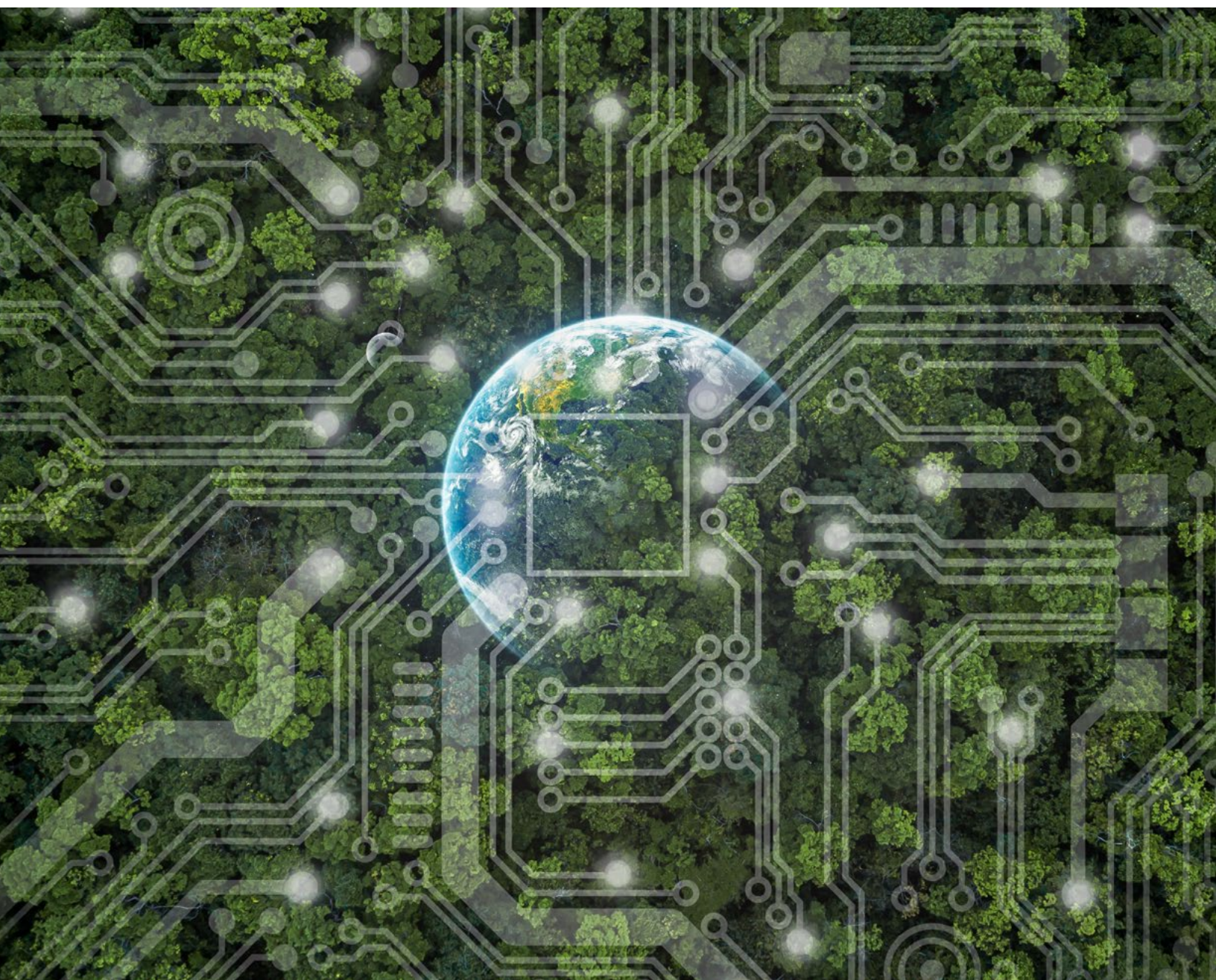
Base de datos de las áreas reportadas con procesos de manejo forestal sostenible:

Si bien es considerada una estrategia de restauración en las que se encuentra involucrado el bosque, se espera una dinámica distinta a la del resto de estrategias, ya que contempla prácticas de uso sostenible (p. ej.: forestería comunitaria). En primer lugar, en estas áreas predomina la cobertura de bosque y, por lo tanto, la mayor parte de la superficie aparecería en el monitoreo propuesto como áreas sin evidencia de ganancia de coberturas de vegetación leñosa o bosque, sin que esto implique que no sea un proceso exitoso. Así mismo, puede existir una dinámica de degradación o pérdidas del bosque propias de las actividades de aprovechamiento sostenible o pérdidas y posteriores ganancias sucesivas como parte del manejo del bosque, que no sería apropiado contabilizar como “no persistencia” de los resultados. Por lo tanto, teniendo en cuenta los objetivos y las dinámicas particulares en estas áreas, **se recomienda un monitoreo independiente, en el que, además de las ganancias de coberturas de bosque obtenidos con el protocolo, se incluya el seguimiento del bosque estable y la deforestación a partir de los resultados del monitoreo anual de la superficie de bosque y la deforestación realizado por el SMBYC.**



Base de datos de las áreas reportadas con procesos de restauración de otros ecosistemas o áreas no monitoreadas:

En esta base de datos se incluyen todas las áreas que no cumplen con los criterios para ser incluidas en algunas de las tres bases anteriores pero que pueden ser de interés para otras estrategias de monitoreo (p. ej.: otros ecosistemas) o análisis. En la base de datos se recomienda incluir un campo en el que se especifique la razón por la que se excluyó, lo que facilita seleccionar las áreas para otros análisis y documentar el proceso de filtrado. **El protocolo no está diseñado para el monitoreo de estas áreas.**



NIVEL NACIONAL

La siguiente es la lista de chequeo que se recomienda utilizar para filtrar los polígonos y asignarlos a las bases de datos correspondientes. Se sugiere re-

visar uno a uno los polígonos antes de incorporarlos a la base de datos, utilizando las imágenes de satélite disponibles.

1

Áreas o porciones de áreas reportadas que se encuentran urbanizadas en la actualidad o que correspondan a espejos de agua no asociados a manglares u otros bosques inundables (p. ej.: lagunas, embalses). En caso de que las zonas urbanizadas o de agua no ocupen todo el polígono, se excluye únicamente la parte correspondiente, siempre y cuando la porción restante cumpla los criterios de área. Para este filtro se recomienda usar las imágenes de satélite recientes disponibles (figura 8a y figura 8b).



2

Áreas en zonas de páramos o reportadas para restauración de vegetación de páramo. Se recomienda consultar imágenes de satélite y utilizar como apoyo el mapa de ecosistemas y el mapa de páramos (figura 8c).

Áreas reportadas con procesos de restauración de humedales, distintos a los bosques inundables y manglares.

Áreas con estrategias de remediación, fitorremediación, obras biomecánicas.



3

Áreas con estrategia de revegetalización con evidencia de que no corresponde a una ganancia potencial de bosque (imágenes de satélite o especies reportadas de hierbas, gramíneas, etc.). Si bien esta es una estrategia del enfoque de recuperación, en la recopilación de la información disponible se identificaron áreas reportadas con estrategia de revegetalización, con evidencia de restauración del bosque con especies nativas. Por precaución, si no se tiene evidencia de lo contrario, se incluirán en los análisis de restauración potencial a bosque.



NIVEL NACIONAL

4

Áreas con estrategias de manejo forestal sostenible y otras herramientas del paisaje (figura 8f).



5

Polígonos con geometrías que evidentemente no representan áreas coherentes en el terreno (p. ej.: triángulos) o áreas extensas de más de 30hectáreas, con estrategias específicas de restauración ecológica pasiva o activa, plantaciones forestales protectoras, protectoras productoras o revegetalización en las que se observa con las imágenes de satélite que podría corresponder a un área generalizada o a un proyecto más grande y no a un área específica de restauración de bosque. Si esta condición no es evidente, se recomienda no excluir el polígono (figura 8e).



6

Áreas con estrategias de cercas vivas, barreras rompeviento, sistemas agroforestales y silvopastoriles (verificar áreas con imágenes y especies reportadas).



7

Áreas o porciones de áreas registradas como plantaciones forestales comerciales (consultar información de las plantaciones forestales comerciales registradas).



NIVEL NACIONAL

8

Áreas menores a 0,5 hectáreas y áreas entre 0,5 y 1 hectáreas que no se encuentren contiguas a otros polígonos de restauración potencial a bosque o a coberturas de bosque. Para determinar esta condición se recomienda utilizar los mapas de superficie cubierta por bosque natural del SMyC (figura 8d).



9

Áreas con cualquier otra característica no incluida anteriormente, en la que sea evidente que no se está llevando o se llevará a cabo un proceso de restauración potencial del bosque.



10

Las áreas que no han sido asignadas a las bases de datos 2, 3 o 4 en este punto del filtro, serán consideradas áreas con procesos de restauración potencial a bosque.



Es probable que luego del filtro anterior, la base de datos de las áreas con procesos de restauración potencial del bosque incluya polígonos para los que no se reportó una estrategia específica o no se cuenta con información que confirme el objetivo de recuperar un ecosistema forestal. Sin embargo, de acuerdo con la información recopilada para el diseño del protocolo, estos casos son comunes en los reportes disponibles, y por precaución se recomienda incluir estas áreas en el monitoreo. De

ahí la importancia de articular y mejorar la calidad y completitud de los reportes y recopilación de la información por parte de los distintos actores, así como la conveniencia de incluir en los aplicativos un campo en el que se especifique el ecosistema o cobertura objetivo, que facilite filtrar las áreas de interés para el monitoreo. Finalmente, además de los ajustes topológicos indicados, se recomienda no modificar los polígonos, ya que corresponden a reportes formales de las entidades.

Figura 8

Ejemplos de los criterios aplicados para filtrar las áreas con procesos de restauración, reportadas y recopiladas para el análisis



A

Polígonos de restauración con áreas urbanizadas en la actualidad que se eliminan del análisis.

Fuente: Google Earth (19 de febrero de 2023).



B

Cuerpos de agua no asociados a bosques inundables o manglares que se eliminan del análisis.

Fuente: Google Earth (1 de agosto de 2022).

NIVEL NACIONAL



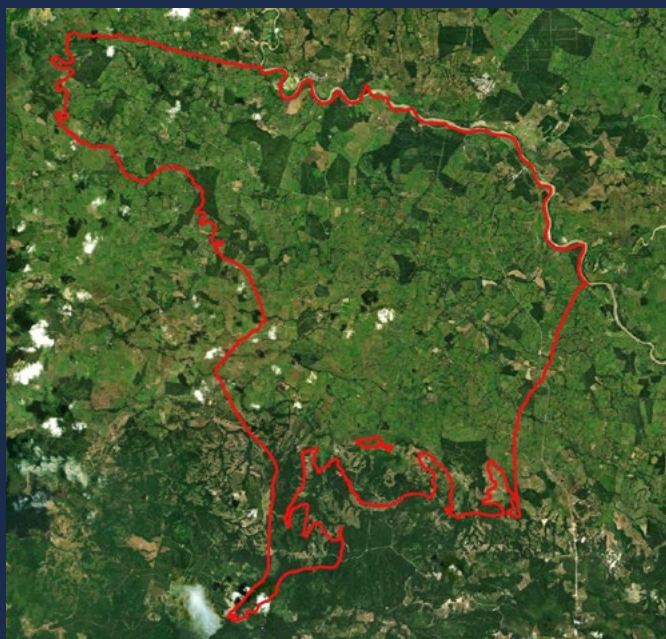
C

Áreas de restauración de ecosistemas distintos al bosque (páramo) que se excluyen del análisis.
Fuente: Google Earth (1 de octubre de 2020).



D

Polígono entre 0,5 y 1 ha (0,67 hectáreas) incluido en el análisis de restauración potencial a bosque debido a que se encuentra adyacente a una superficie de bosques existente. En consecuencia, el área del bosque total cumpliría con el criterio de área mínima de 1 ha establecida en la definición adoptada por Colombia para los reportes de superficies de bosque.
Fuente: Google Earth (9 de junio de 2017).



E

Polígonos reportados de gran extensión, con geometría incoherente según lo observado en las imágenes y que claramente no corresponden al área específica de implementación de las actividades de restauración. Algunas de estas áreas son reportadas en las bases de datos de la ANLA en estado de área preliminar para la intervención.
Fuente: Google Earth (24 de diciembre de 2022).

NIVEL NACIONAL



F

Áreas con estrategia de manejo forestal sostenible en 2018, año de implementación (arriba), y en 2023 (abajo). Estas áreas incluyen zonas extensas donde ya existía cobertura de bosque, zonas de pérdida de bosque (probablemente porque esta estrategia contempla el uso o aprovechamiento sostenible del bosque) y zonas en las que se está recuperando la cobertura forestal. Teniendo en cuenta la dinámica particular de esta estrategia se sugiere un monitoreo independiente.

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

Un caso que vale la pena considerar es el de ANLA, entidad que recopila y reporta una gran cantidad de áreas en restauración. Existen dos fuentes de consulta para acceder a estas áreas: 1) Sistema Ágil: el portal de ANLA en el que se reportan las áreas de compensación/inversión (no solo de restauración), con una estructura de datos propia acorde a la reglamentación existente, y 2) el módulo de plantaciones protectoras/restauración

del SNIF (Ideam), donde ANLA reporta específicamente las áreas con actividades de restauración. Se dará preferencia a los reportes realizados por ANLA en el SNIF, ya que la información se encuentra almacenada siguiendo la estructura adoptada para la implementación del protocolo. En caso de que se incorpore directamente la información proveniente del Sistema Ágil, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:



1

Seleccionar las actividades y subactividades que corresponden a restauración potencial del bosque y otras coberturas forestales:

restauración ecológica, rehabilitación, recuperación, reforestación protectora, herramientas de manejo del paisaje, silvopastoriles, agroforestales, aislamientos para sucesión natural, enriquecimiento vegetal, cercas vivas o barreras, etc. No se tienen en cuenta subactividades de saneamiento predial, obras civiles, acuerdos de conservación, apoyo a áreas protegidas, planes de manejo ambiental, elaboración de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), obras de geotecnia, rectificación de cauces, tratamiento de aguas residuales, capacitación ambiental, monitoreo hidrobiológico y similares.



2

Estandarizar los campos de la estructura del Sistema Ágil a los campos de la base de datos para el monitoreo (incluir los campos de registro administrativo, coberturas y estado).



3

Revisar los polígonos reportados como áreas preliminares o en evaluación: Eliminar áreas muy extensas que evidentemente no correspondan al área de implementación específica (figura 8f). Para las áreas históricas (desde 2007), eliminar las áreas preliminares o en evaluación en las que no se observe ganancia de vegetación leñosa/bosque luego de 5 años de la fecha de implementación reportada.





ETAPA 2

ELABORACIÓN DEL MAPA DE RESTAURACIÓN DEL BOSQUE A PARTIR DE DATOS DE SENSORES REMOTOS



Unidad de observación y análisis: cada uno de los píxeles de 30 x 30 metros derivados de las imágenes de satélite del programa Landsat que se encuentran incluidos dentro de las áreas reportadas con procesos de restauración y de los cuales se obtiene la información espectral para determinar si la unidad presenta evidencia de ganancia de cobertura de vegetación que potencialmente podría llegar a una cobertura de bosque. Se genera información para la totalidad del universo de estudio (áreas recopiladas en proceso de restauración).

INSUMOS DE SENSORES REMOTOS

El mapa de la restauración del bosque se elabora utilizando análisis de series de tiempo de las imágenes de satélite de mediana resolución adquiridas por el programa satelital Landsat. Adicionalmente, se recomienda utilizar imágenes de apoyo disponibles, especialmente de alta y muy alta resolución, siempre y cuando se conozca la fecha de toma.



Imágenes de los sensores Landsat: se emplean los productos de reflectancia de la superficie (productos que incluyen un proceso de corrección atmosférica), con fecha de toma entre el inicio y el final del periodo de análisis, que para el monitoreo anual corresponden al 1 de enero y

al 31 de diciembre. Para el análisis de series de tiempo se utilizan las imágenes de este programa satelital teniendo en cuenta que:

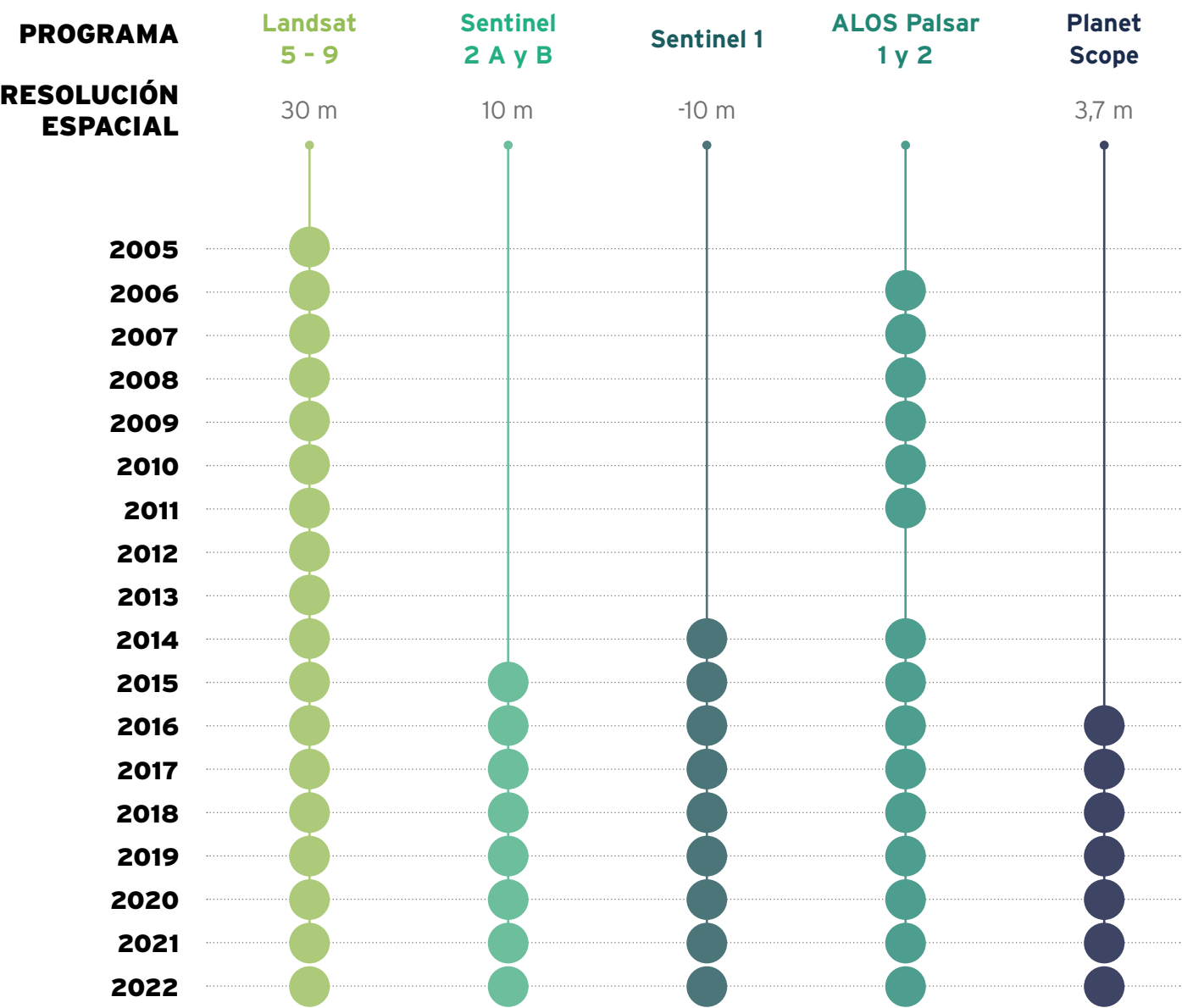
- Es el único programa satelital con datos de series de tiempo densas y continuas que cubren el periodo de la línea base 2007-2022 (figura 9).
- Las imágenes se pueden obtener con niveles de preprocesamiento adecuados para realizar análisis de series de tiempo (información periódica, corrección radiométrica y atmosférica, coregistro espacial a nivel de píxel), constituyéndose como el conjunto de datos de satélite más utilizado para el análisis de series temporales y que ha mostrado potencial para detectar cambios graduales de las coberturas de bosque (Huang *et al.*, 2009; Decuyper *et al.*, 2022; Zhu, 2017).
- Es un programa robusto y con proyección a futuro, por lo que existe una alta probabilidad de contar con imágenes a largo plazo para dar continuidad al monitoreo.
- Son imágenes de resolución media, adecuadas para un monitoreo del nivel nacional y constituyen el insumo principal utilizado para el monitoreo de la superficie de bosque realizado por el SMByC, lo que facilita la comparabilidad y la integración de los resultados espacial y temáticamente (se recomienda mantener el coregistro a nivel de píxel con los productos del SMByC).
- Favorecen la sostenibilidad económica del monitoreo a largo plazo.



NIVEL NACIONAL

Figura 9

Disponibilidad de datos de sensores remotos operativos actualmente para el análisis de series de tiempo



Fuente: elaboración propia.

2

Imágenes de apoyo: en la implementación del protocolo es importante usar imágenes de alta resolución para el ajuste del mapa resultante del análisis de series de tiempo y para el proceso de evaluación de la exactitud y la estimación de las áreas mediante el muestreo. Estas imágenes

permiten identificar con un mejor nivel de detalle el tipo de coberturas que están creciendo en las áreas con procesos de restauración disminuyendo el tiempo de retraso en la detección de las evidencias de ganancia de vegetación, especialmente cuando se lleva a cabo la siembra de individuos, ya que en algunos casos es posible observar las huellas de las intervenciones (figura 10).

NIVEL NACIONAL

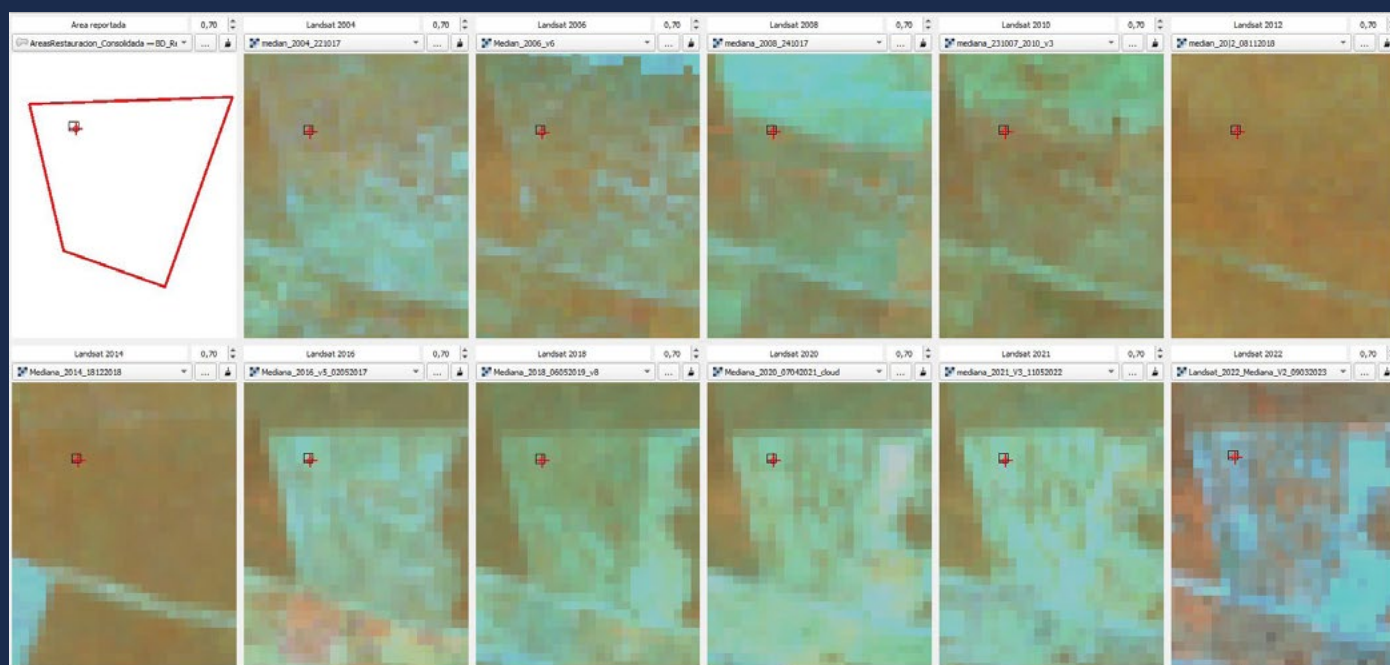
Figura 10

Ejemplo de pérdidas y ganancias de vegetación leñosa/bosque observadas entre 2007 y 2022 en un área reportada con procesos de restauración



A

Ganancias y pérdidas observadas en las imágenes de alta resolución, en las que es posible identificar la siembra de individuos en una etapa temprana del proceso de restauración, no detectables en las imágenes de mediana resolución. Fuente: Google Earth y Securewatch (Maxar) (2007, 2012, 2016 y 2022).



B

Ganancias y pérdidas observadas en imágenes de mediana resolución. Con este tipo de insumos se tiene una alta densidad de imágenes para todo el periodo de la línea base, lo que permite implementar análisis de series de tiempo. Fuente: compuestos anuales del valor de la mediana derivados de los sensores Landsat 5, 7, 8 y 9, generados por el SByC (2006, 2008, 2010, 2012 2014, 2016, 2018, 2020, 2021 y 2022).

NIVEL NACIONAL

Si bien las imágenes de alta resolución permiten observar en detalle los procesos de restauración, no es viable en la actualidad realizar un monitoreo a nivel nacional utilizando estas imágenes como insumo principal debido a los altos costos y a que no se cuenta con datos de series densas históricas para el monitoreo de las áreas que fueron implementadas en las últimas décadas, ni con un cubrimiento geográfico que abarque la totalidad de las áreas con procesos de restauración reportadas.

Igualmente, las imágenes Sentinel 2 y los productos Planet Scope, adquiridos mediante acuerdos nacionales, pueden servir de apoyo para el ajuste del mapa en las fechas en las que se encuentran disponibles (figura 9). Se recomienda explorar a futuro el uso de los datos tomados por estos sensores para el monitoreo anual.

PREPROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT

La construcción de series de tiempo requiere que las imágenes se encuentren con un nivel

de preprocesamiento adecuado para lograr una consistencia y comparabilidad entre las fechas (véase sección “Monitoreo de la restauración del bosque integrado a los sistemas nacionales de monitoreo del bosque” del Marco teórico), incluyendo la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, así como el enmascaramiento de las nubes y sombras presentes (Huang *et al.*, 2009; Kennedy *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2015; Zhu, 2017; Qiu *et al.*, 2019). En el caso de Landsat, desde 2016 el USGS pone a disposición las imágenes con valores de reflectancia de la superficie y ajustes radiométricos y geométricos (incluido el coregistro a nivel de píxel) adecuados para implementar análisis de series de tiempo (Qiu *et al.*, 2019).

Partiendo de las imágenes de reflectancia de la superficie suministradas por el USGS, se recomienda implementar el mismo método de preprocesamiento utilizado por el SMBYC para el monitoreo anual de la superficie de bosque (Galindo *et al.*, 2014; Ideam, 2019), tal y como se ve en la figura 11:

Figura 11

Preprocesamiento de las imágenes de satélite Landsat como insumo para el análisis de series de tiempo



Fuente: elaboración propia.



NIVEL NACIONAL



Apilamiento de las bandas: se apilan al menos las bandas correspondientes a las longitudes de onda del rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojos de onda corta (SWIR1 y SWIR2), las cuales resultan útiles para construir la mayoría de los índices asociados a la vegetación.



Enmascaramiento: es necesario eliminar aquellos píxeles que corresponden a nubes, brumas, sombra o bandeamiento (franjas sistemáticas sin información de las imágenes del sensor Landsat 7). En este proceso se suele utilizar la banda de calidad QA, incluida en las imágenes Landsat, bien sea en programas de procesamiento de imágenes o mediante el uso de algoritmos en distintos lenguajes de programación ejecutados localmente o en la nube (p. ej.: Google Earth Engine [GEE], SEPAL). Una opción es utilizar la herramienta CloudMasking¹⁶ para QGIS desarrollada por el SMBYC, la cual incluye variables adicionales a la información de la banda QA para detectar las nubes y sombras. Adicionalmente, ofrece la posibilidad de incorporar ajustes manuales para mejorar la calidad del enmascaramiento.



Normalización radiométrica: se recomienda realizar un proceso de normalización radiométrica de las imágenes de forma que se reduzca la variabilidad ocasionada por las diferencias atmosféricas, de iluminación, calibración del sensor, distorsiones geométricas, entre otras, ajustando las señales radiométricas de las imágenes utilizadas de manera que sean consistentes y comparables entre sí, reduciendo

la influencia del ruido en la detección de los cambios (Olthof *et al.*, 2005; Potapov *et al.*, 2012). Es recomendable el uso de métodos de normalización radiométrica relativos, como el de Canty y Nielsen (2008).

El preprocesamiento se puede realizar en la nube, en la plataforma Google Earth Engine, o, para regiones específicas, en la plataforma SEPAL de FAO¹⁷. Para el análisis dentro del SMBYC es recomendable emplear las imágenes preprocesadas que se utilizan en el monitoreo de la superficie y los cambios de la superficie de bosque, ya que incluyen mejoras en el proceso de enmascaramiento y normalización.

MONITOREO DE LAS ÁREAS EN RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE UTILIZANDO SERIES DE TIEMPO

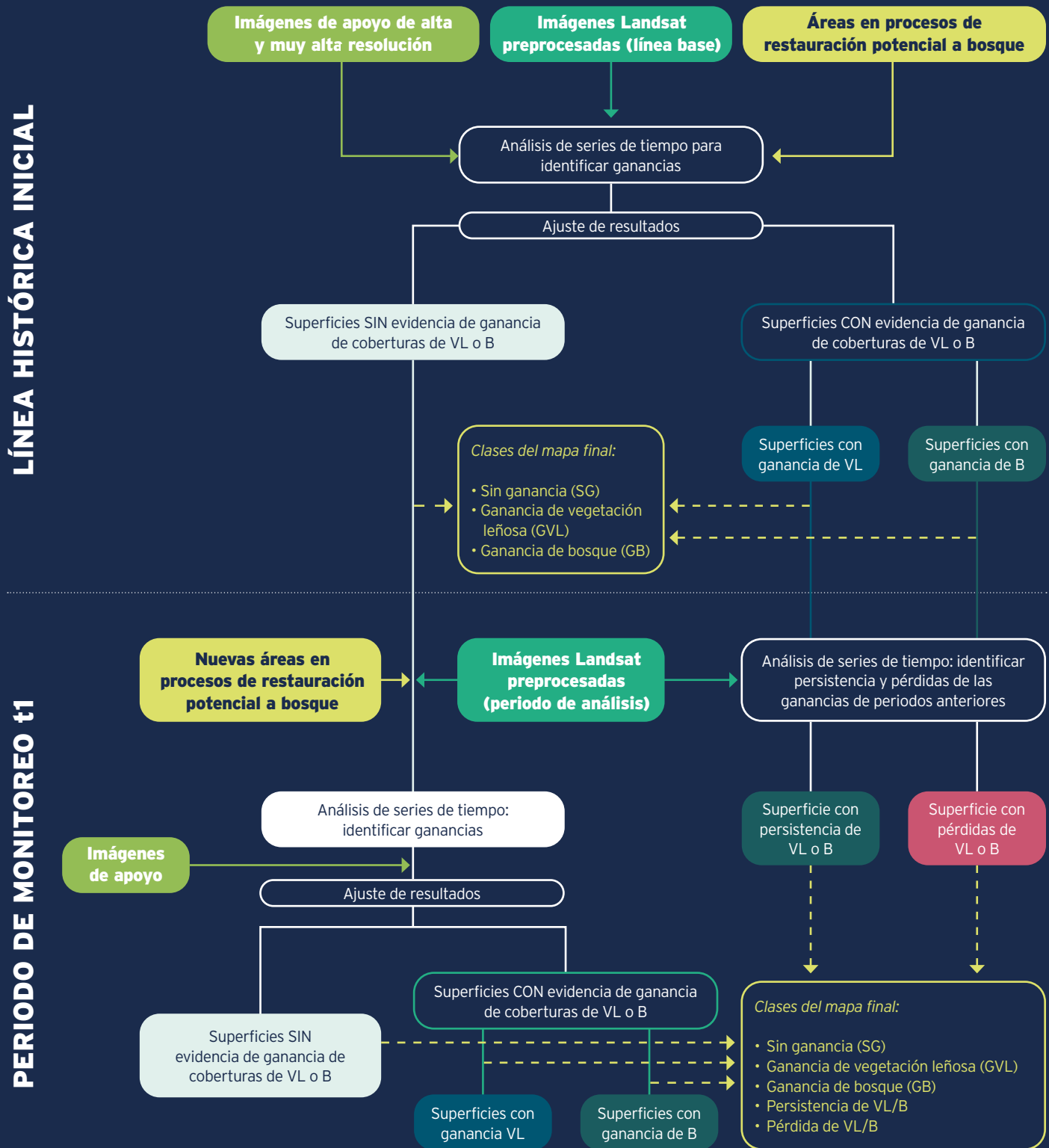
Teniendo en cuenta la variabilidad temporal del proceso de restauración y la necesidad de medir la persistencia de los resultados, es necesario realizar un monitoreo acumulado de las áreas reportadas en procesos de restauración, es decir, que en cada periodo de análisis se evalúen las áreas recopiladas en periodos anteriores junto con los nuevos proyectos implementados y reportados. Con el monitoreo permanente de las áreas se busca registrar las superficies con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosques, así como evaluar la persistencia de los resultados registrados en periodos anteriores (figura 12).

16. <https://github.com/SMBYC/CloudMasking>

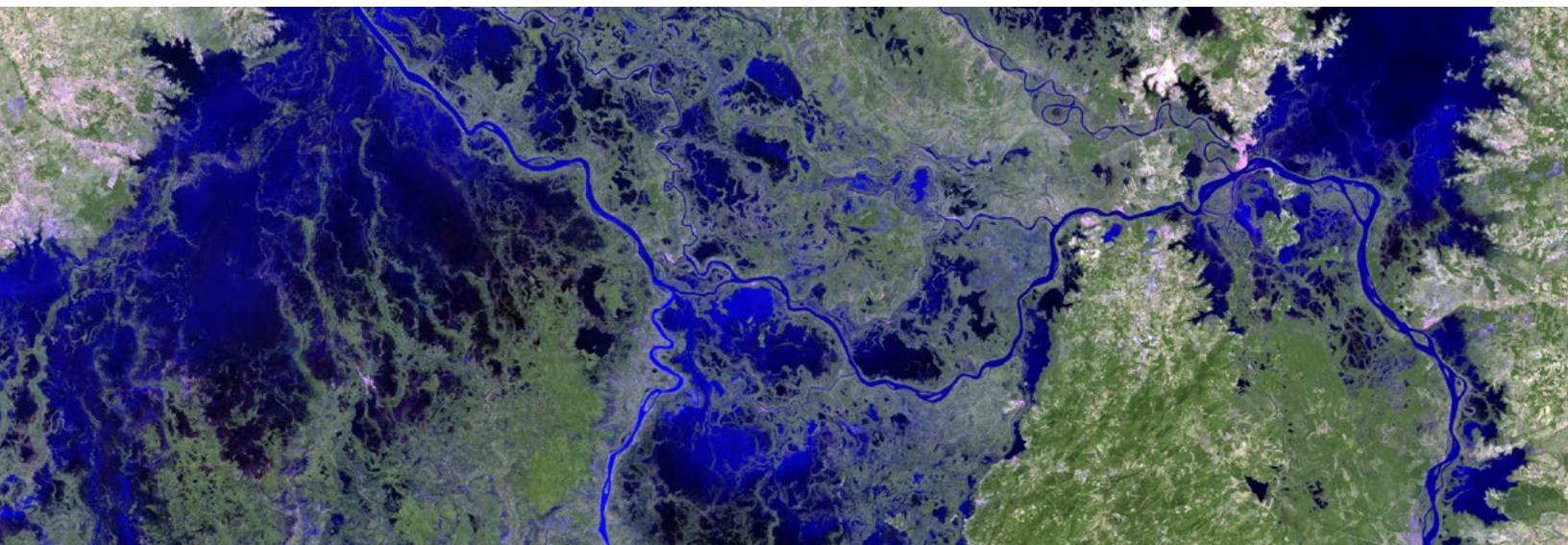
17. <https://sepal.io/>

Figura 12

Esquema de la metodología para el monitoreo de la restauración del bosque de la línea base y del seguimiento anual



Fuente: elaboración propia.



Fotografía: Imágenes de satélite del programa Landsat procesadas para el monitoreo de bosque/ SMBYC (Ideam)

Procesamiento de imágenes de satélite para generar el mapa de la línea base histórica

El intervalo temporal de la línea base se define de acuerdo con la información de las áreas con proceso de restauración disponibles para el análisis. Actualmente, el 98 % de la información recopilada se reportó con fechas de implementación posteriores a 2007. En consecuencia, se propone una línea histórica 2007-2022 y, en la medida en que se recupere una mayor cantidad de información histórica, se recomienda ampliar el periodo de análisis para incluir los años previos.

Análisis de series de tiempo con algoritmos de segmentación

En la selección de los métodos de análisis de series de tiempo, es necesario tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno, especialmente para detectar la ganancia o recuperación de la cobertura forestal. Los análisis de series de tiempo con algoritmos de segmentación (CCDC, BFAST y LandTrendr) son frecuentemente utilizados para el monitoreo del bosque, especialmente para detectar pérdidas, pero también se han empleado para medir la recuperación de las coberturas forestales luego de los disturbios (Liu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2023). Una de las ventajas de estos métodos es que se encuentran implementados mediante

interfaces de programación de aplicaciones (APIs) y herramientas de Google Earth Engine para la visualización y el procesamiento en la nube.

De acuerdo con las características de los datos, las pruebas preliminares y las condiciones específicas del análisis de la línea base histórica a nivel nacional, se propone una primera aproximación con LandTrendr como algoritmo inicial para la detección de la ganancia de vegetación leñosa y bosque, si bien, el protocolo no se limita al uso exclusivo de este algoritmo. CCDC también mostró resultados en la detección de las ganancias para algunas áreas específicas, si bien requiere de mayor capacidad de procesamiento.

LandTrendr está diseñado para el análisis de series de tiempo largas, no requiere definir un periodo de referencia y mostró un buen desempeño durante las pruebas realizadas en la plataforma Google Earth Engine para procesar la superficie total del país. Así mismo, utiliza un único valor anual (medoide) derivado de todas las observaciones disponibles, reduciendo la influencia de la variabilidad intraanual y el ruido debido a las nubes, bruma y otros factores (Kennedy *et al.*, 2018; Pasquarella *et al.*, 2022). El uso de compuestos para la línea base histórica disminuiría el efecto de la alta variabilidad en el número de observaciones anuales, teniendo en cuenta las diferencias en los sensores disponibles para la toma de imágenes durante el periodo de la línea

NIVEL NACIONAL

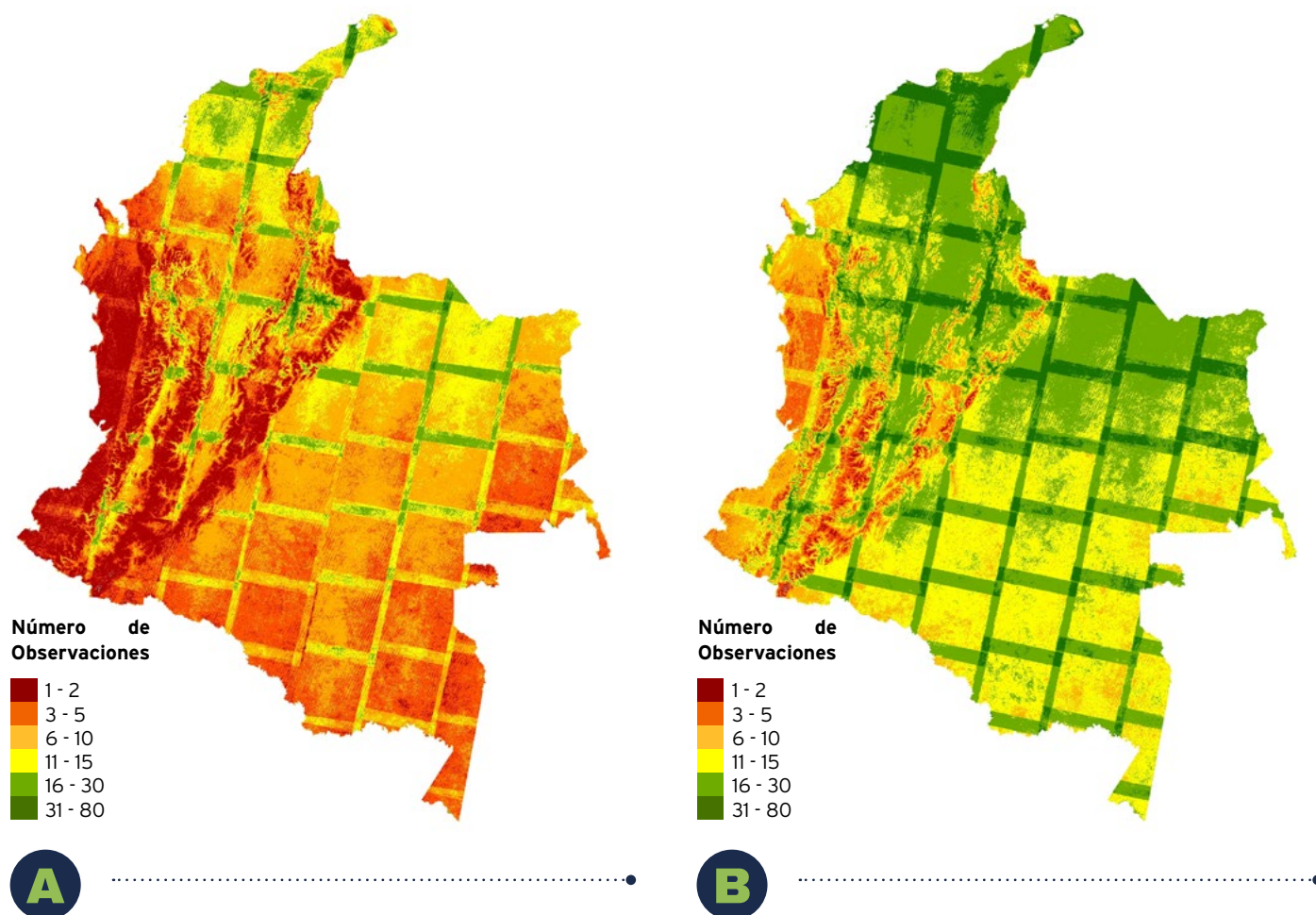
base (Landsat 5 a 9, incluido el bandeo de las líneas sin información de Landsat 7) y, en el caso de Colombia, las condiciones de alta nubosidad en algunas zonas del país, que generan una variabilidad espacial y temporal en el número de observaciones, con regiones en las que se cuenta con menos de 5 datos (incluso 1 o 2) al año (figura 13).

En contraste, aunque CCDC o BFAST Monitor ajustan la serie con los datos disponibles, la densidad de

las observaciones puede incidir en el análisis. Una alta variabilidad en el número de datos genera un ajuste inestable afectando los resultados de la segmentación. CCDC, por ejemplo, identifica los puntos de quiebre en función del número consecutivo de observaciones que se desvían de la trayectoria predicha, por lo que cuando hay pocos datos con largos periodos sin información existirá una tendencia a encontrar falsas detecciones de cambios luego de estos periodos (Pasquarella *et al.*, 2022).

Figura 13

Número de observaciones disponibles anualmente para el análisis de series de tiempo, provenientes de las imágenes de los sensores del programa satelital Landsat



Número mínimo de datos anuales disponibles para el análisis de series de tiempo con las imágenes Landsat adquiridas entre 2016 y 2022, luego de eliminar los píxeles con nubes y sombras.

Número máximo de datos anuales disponibles. Nótese la variabilidad espacial y temporal en el número de observaciones disponibles para Colombia.

Fuente: Mapas elaborados a partir de las imágenes preprocesadas en el SMBYC para el monitoreo de la cobertura y cambio de la cobertura del bosque.

NIVEL NACIONAL

Figura 14

Trayectorias de las series de tiempo para un píxel de un área deforestada utilizando los algoritmos CCDC y LandTrendr



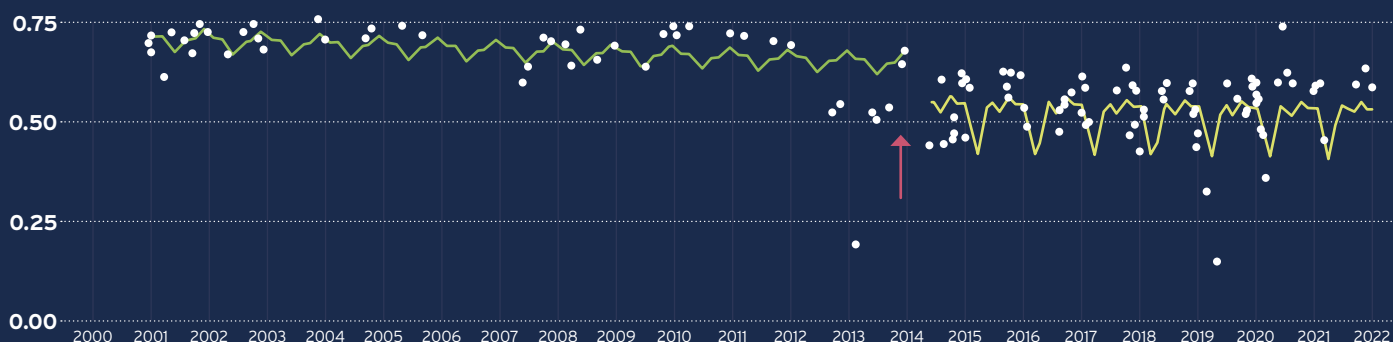
2006

2012

2021

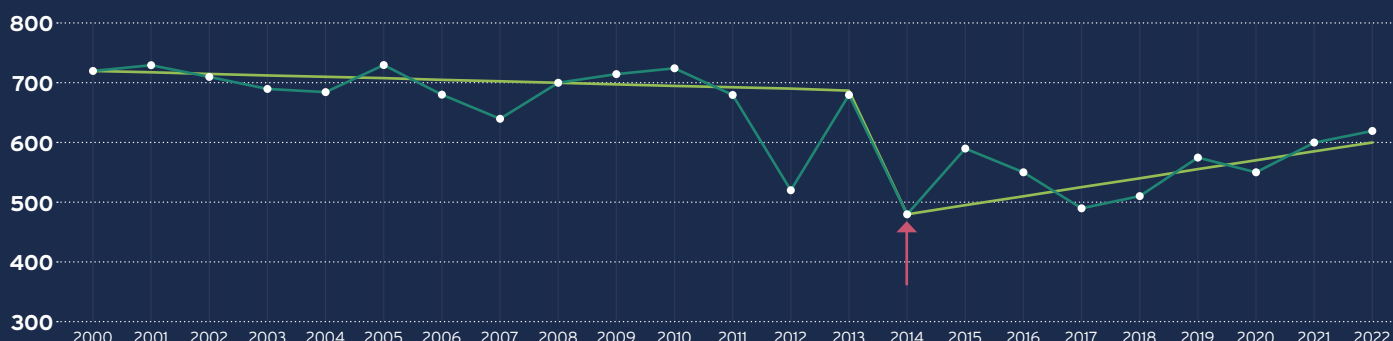
A

Imágenes de alta resolución antes y después de la pérdida del bosque ocurrida en 2014. Fuente: Google Earth (6 de febrero de 2006, 10 de agosto de 2012 y 12 de enero de 2021).



B

Serie de tiempo empleando el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) para un píxel (punto negro en las imágenes), aplicando el algoritmo CCDC (b).



C

Serie de tiempo empleando el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) para un píxel (punto negro en las imágenes), aplicando el algoritmo LandTrendr.

Nota: En cada gráfica se muestran los valores originales (puntos blancos) y las trayectorias ajustadas (línea verde clara en LandTrendr, verde y amarilla en CCDC). En este caso, los dos algoritmos detectaron la pérdida ocurrida en 2014 y segmentaron la trayectoria de la serie.

Fuente: elaboración propia utilizando herramientas de Google Earth Engine: "UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter" (<https://emaprlab.users.earthengine.app/view/lt-gee-change-mapper>) y "CCDC Results Visualization (GUI)" (<https://parevalo-bu.users.earthengine.app/view/advanced-tstools>).

NIVEL NACIONAL

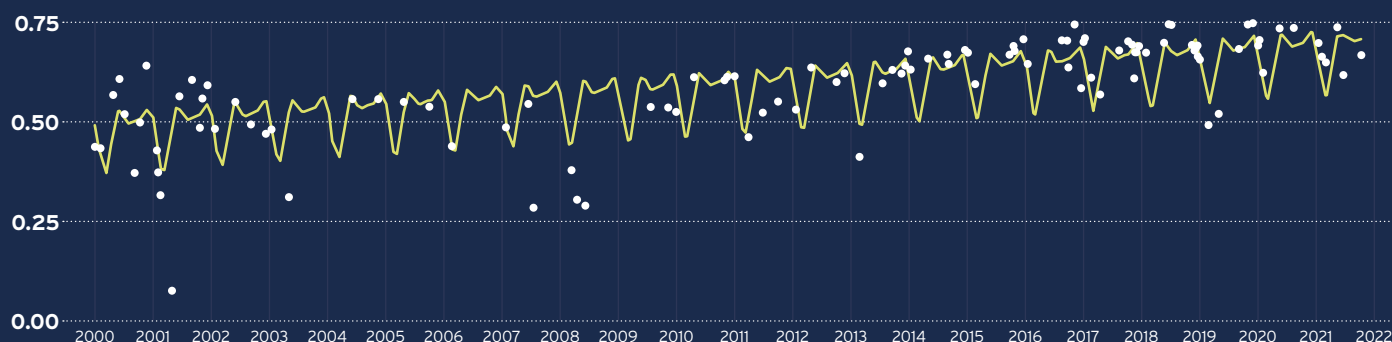
Figura 15

Trayectorias de las series de tiempo para un píxel de un área con bosque restaurado utilizando los algoritmos CCDC y LandTrendr



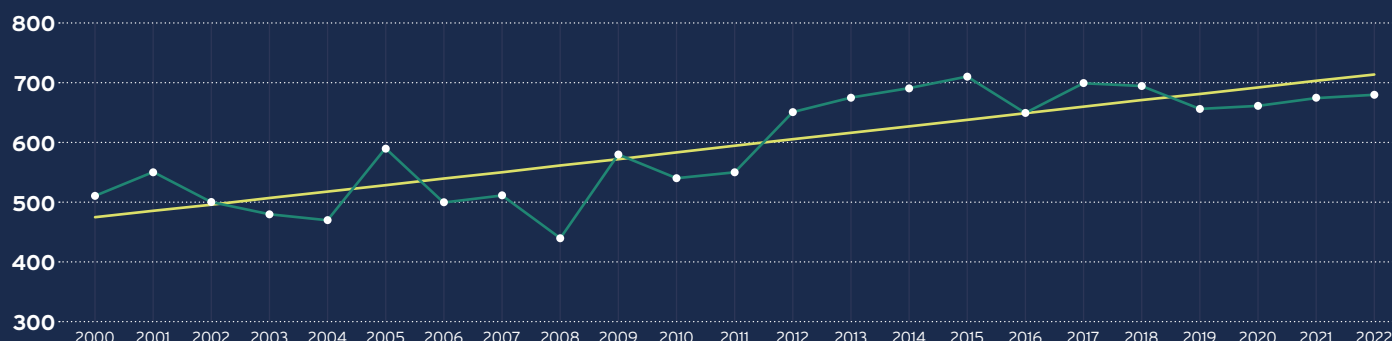
A

Imágenes de alta resolución en las que se observa el crecimiento de la cobertura de bosque. Fuente: Google Earth (6 de febrero de 2006, 22 de diciembre de 2013 y 12 de enero de 2021).



B

Serie de tiempo empleando el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) para un píxel (punto negro en las imágenes), aplicando el algoritmo CCDC.



C

Serie de tiempo empleando el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) para un píxel (punto negro en las imágenes), aplicando el algoritmo LandTrendr.

Nota: En cada gráfica se muestran los valores originales (puntos blancos) y las trayectorias ajustadas (amarillas). En este caso, los algoritmos detectaron la tendencia en el incremento del índice, aunque no se identificó un punto de cambio para segmentar la trayectoria. Sin embargo, es posible identificar los cambios a partir de los resultados de la magnitud del cambio y la tendencia creciente de los datos.

Fuente: elaboración propia utilizando herramientas de Google Earth Engine: "UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter" (<https://emaprlab.users.earthengine.app/view/lt-gee-change-mapper>) y "CCDC Results Visualization (GUI)" (<https://parevalo-bu.users.earthengine.app/view/advanced-tstools>).

NIVEL NACIONAL

En las pruebas realizadas, LandTrendr y CCDC permitieron identificar las ganancias a partir del resultado de la magnitud del cambio o los coeficientes calculados por los algoritmos (figura 16), si bien no siempre logran detectar los puntos de ruptura (vértices o cortes, según el algoritmo) para segmentar la serie temporal (figura 14 y figura 15) y, por lo tanto, no siempre se identifica una fecha y duración para todas las ganancias de cobertura. Los algoritmos de segmentación como LandTrendr y CCDC son altamente eficaces en la detección de cambios discretos (Pasquarella *et al.*, 2022), aunque, en el caso de la restauración, el crecimiento del bosque tiene una dinámica gradual con cambios sutiles (Liu *et al.*, 2017). Adicionalmente, el comportamiento de los datos previo al crecimiento de la vegetación leñosa y el bosque es altamente variable, con distintas coberturas y dinámicas (pastos, minería, cultivos, vegetación secundaria, etc.), lo que puede hacer más difícil el proceso de identificar el punto de cambio en la serie.

En el caso de LandTrendr, el resultado de la magnitud debe ser revisado para determinar el umbral de valores asociados a las ganancias de vegetación leñosa y de bosque (figura 16). En primer lugar, se recomienda extraer los valores de la magnitud en sitios donde previamente se observó el crecimiento de las coberturas de interés, identificando el rango de valores máximos y mínimos correspondiente. Posteriormente, se prueban rangos de distinta amplitud dentro de los valores identificados, realizando evaluaciones de exactitud temática a partir de muestreos probabilísticos (véase Etapa 3) para determinar el umbral de valores que resulta más adecuado. En general, un balance entre los errores de omisión y comisión es deseable. Esta evaluación se debe emplear también para la selección del índice o variable que ofrece los mejores resultados y en la parametrización del algoritmo.

Figura 16

Detección de cambios utilizando análisis de series de tiempo con el algoritmo LandTrendr



A

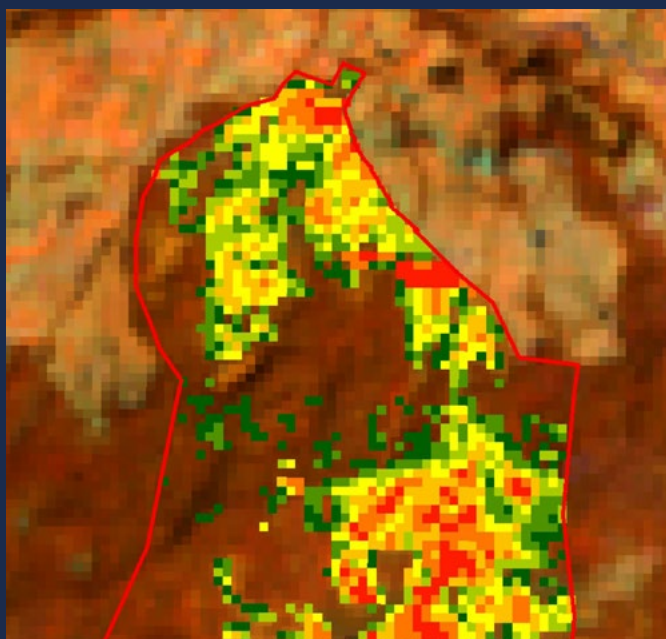
Ganancia de vegetación leñosa y bosque observada en las imágenes de mediana resolución Landsat. Fuente: compuestos anuales Landsat con los valores de la mediana para 2006 y 2022, generados por el SMBYC.

NIVEL NACIONAL



B

Ganancia de vegetación leñosa y bosque en imágenes de alta resolución. Fuente: Google Earth (9 de enero de 2001 y 1 de febrero de 2023).



C

Capa de magnitud del cambio detectado en la serie de tiempo 2001-2022 con LandTrendr, utilizando el índice NBR. Fuente: elaboración propia.

Si se quiere tener información de la línea base histórica discriminada en periodos más cortos, se puede utilizar la muestra de referencia de la evaluación temática para estimar la proporción de la superficie con ganancia de vegetación leñosa y bosque en cada uno de estos periodos (véase sección

“Análisis” de la Etapa 3). Si bien en las pruebas del protocolo se subdividió la línea base en tres periodos: 2007-2014, 2015-2018 y 2019-2022, se sugiere realizar una medición cada dos años para capturar la dinámica completa de los cambios (p. ej.: una ganancia seguida de una pérdida ocurrida en menos de 4 años).



Algunas recomendaciones o pasos que seguir para incrementar la eficacia de la detección de las ganancias con series de tiempo



1

Para disminuir el efecto del número de observaciones en algoritmos como CCDC o BFAST Monitor (por datos escasos o alta variabilidad), se puede probar el uso de funciones de relleno para datos faltantes, eliminación de años sin datos y la reducción de datos en zonas de alta densidad, por ejemplo, eliminando las áreas de solapamiento (Arévalo *et al.*, 2020b; Pasquarella *et al.*, 2022) o enfoques como el propuesto por Tollerud *et al.* (2023) para CCDC.



2

El uso de algoritmos de ajuste de los datos individuales como CCDC o BFAST Monitor en las áreas de clima seco a semiárido del Caribe y de la región andina pueden mejorar la detección en estas zonas al capturar e incluir en el análisis la estacionalidad de la vegetación.



3

Es recomendable incluir en la serie de tiempo una ventana temporal previa al periodo de análisis. En las pruebas locales realizadas, una ventana de 7 años mejoró la identificación de los cambios por ganancia, especialmente en CCDC.



4

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas con algoritmos de segmentación para el diseño del protocolo, la incorporación de análisis de series con otros enfoques podría mejorar la eficacia en la detección de los cambios por ganancias, bien sea para aplicarlos como único método o para combinarlos con LandTrendr, BFAST Monitor o CCDC. De hecho, se han reportado mejores resultados en la detección del crecimiento del bosque secundario con ensambles que incluyen más de un algoritmo (Zhang *et al.*, 2023). Se recomienda incorporar paulatinamente otros enfoques que permitan mejorar el rendimiento y disminuir los tiempos de ajuste. Algoritmos como CUSUM que no asumen una relación lineal entre el tiempo y la respuesta espectral pueden ser probados, ya que toman en cuenta que las tendencias pueden variar en el tiempo (comportamiento observado en las pruebas del protocolo). Este algoritmo, analiza la serie como una suma acumulada de las diferencias entre los valores de cada punto de la serie y la media. Existen reportes puntuales en la bibliografía que señalan su utilidad para detectar cambios lentos, tanto en aplicaciones espaciales como no espaciales (Manogaran y López; 2018; Puhm *et al.*, 2020; Bullock *et al.*, 2020; Ruiz-Ramos *et al.*, 2020).



Variables o índices para el análisis de la serie temporal

El índice de quemas normalizado NBR $((NIR - SWIR 2)/(NIR + SWIR 2))$, seguido de la banda SWIR 1 arrojaron los mejores resultados en la detección de ganancias de vegetación leñosa y bosque, con una mayor exactitud de productor (menor proporción de omisiones) que los obtenidos con otros índices como NDVI, EVI, *greeness* y *wetness* de la transformación *tasseled cap*.

Procesamiento de imágenes de satélite para el monitoreo anual

El seguimiento anual se realiza con dos objetivos (figura 12):



Detectar nuevas ganancias en las coberturas de bosque y vegetación leñosa.



Evaluar la permanencia de las ganancias detectadas en los periodos anteriores.

La detección de ganancias de las coberturas de bosque y vegetación leñosa se aplica para la superficie del periodo anterior en la que no se detectaron cambios (clase “Sin ganancia (SG)” del mapa) y para las nuevas áreas recopiladas (figura 12).

Se utilizan los algoritmos de serie de tiempo de manera similar a la línea base. En este caso es recomendable el uso de algoritmos de detección “en línea” (*online*) como CCDC o BFAST, que permiten detectar los cambios para una fecha concreta y en la medida en que se adicionan nuevas observaciones, a diferencia de LandTrendr que utiliza la serie completa para identificar los cambios (Pasquarella *et al.*, 2022). Se aclara que el protocolo no restringe el uso de estos algoritmos específicos, por el contrario, como parte de las buenas prácticas para mejorar el proceso es importante probar otros enfoques que mejoren la efectividad en la detección.

Para construir la serie de tiempo se recomienda utilizar el mismo rango temporal de la línea base, adicionando las imágenes correspondientes a cada

nuevo periodo de monitoreo, teniendo en cuenta que los resultados en la detección de las ganancias mejoran al utilizar series de tiempo más largas. Se asigna como fecha de la detección del 1 de enero al 31 de diciembre del año monitoreado.

Permanencia de las ganancias detectadas en los periodos anteriores

Se evalúa sobre las áreas acumuladas de ganancia de bosque y vegetación leñosa del periodo anterior (figura 12), si bien en este caso se emplea el análisis de serie de tiempo para identificar las pérdidas. LandTrendr y CCDC han mostrado ser eficientes para detectar este tipo de cambios (figura 14 y figura 15).

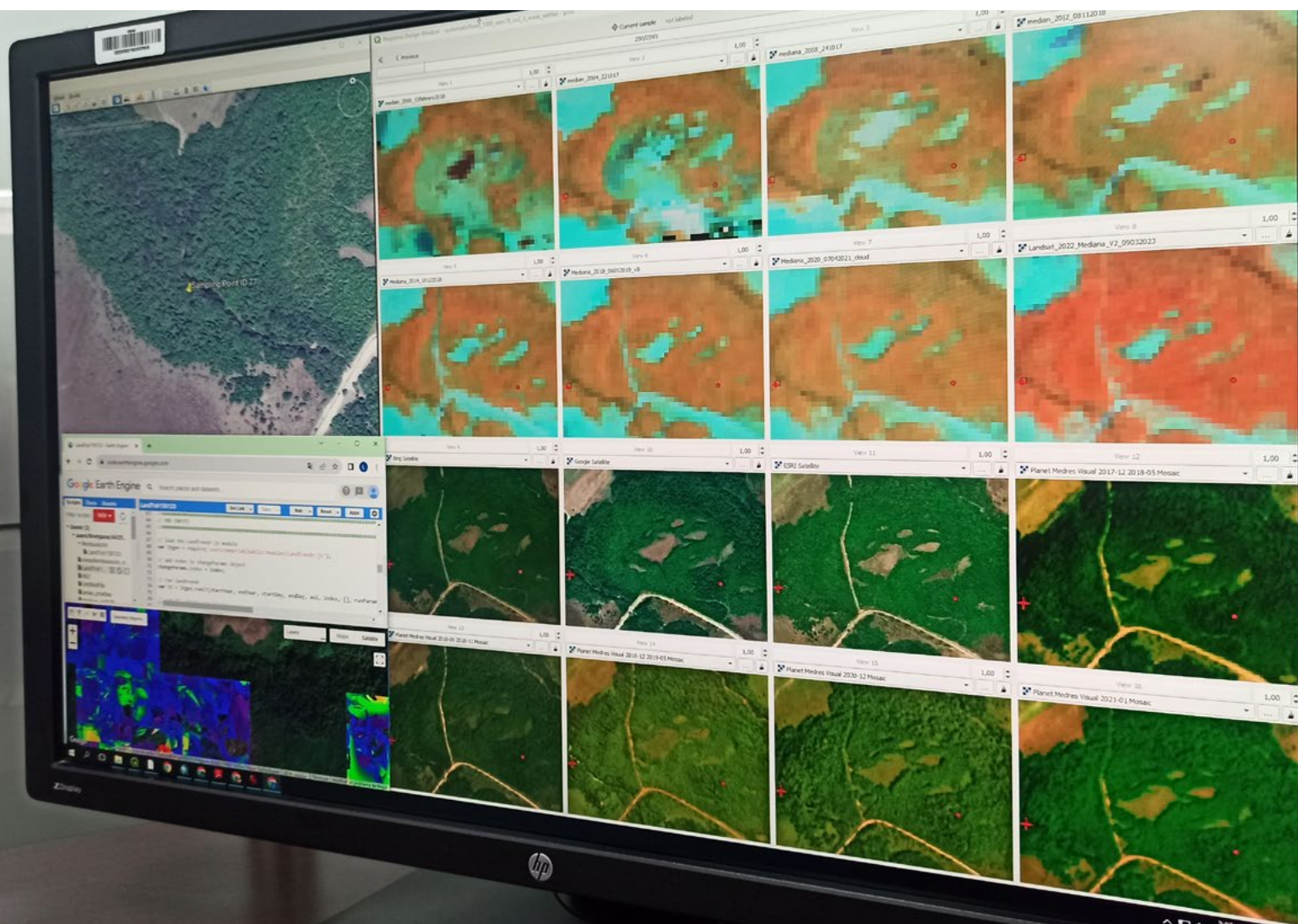
En este proceso se evalúa también la cobertura de vegetación leñosa para determinar las superficies que pueden ser contabilizadas como bosque. De acuerdo con las pruebas realizadas, para asignar la clase “ganancia de bosque” a un área determinada, esta debió categorizarse como vegetación leñosa durante, al menos, cuatro años consecutivos.

Los resultados de los dos análisis se integran en una única capa geográfica con las clases:

- Sin ganancia (SG)
- Ganancia de vegetación leñosa (GVL)
- Ganancia de bosque (GB)
- Persistencia de VL/bosque
- Pérdida de VL/bosque

REVISIÓN Y AJUSTE DE LOS RESULTADOS

El resultado del análisis de la serie de tiempo (línea base histórica o monitoreo periódico) debe ser revisado y ajustado utilizando las imágenes empleadas en el análisis de la serie de tiempo, junto con los demás insumos de apoyo disponibles para el periodo de análisis (p. ej.: Sentinel, Planet Scope, Digital Globe, y otras fuentes de alta resolución), siempre y cuando se conozca la fecha de toma de las imágenes.



Fotografía: Procesamiento de imágenes de satélite / SMBYC (Ideam)

El proceso de revisión y ajuste debe garantizar:

- 

El ajuste de los errores en la detección de cambios que no estén asociados a ganancia de coberturas leñosas y bosque (errores de comisión) o ganancias no detectadas por los algoritmos (omisiones).
- 

La incorporación de la evidencia de procesos de restauración en etapas tempranas no identificables en las series de tiempo con los insumos de mediana resolución y que se detecten en las imágenes de alta y muy alta resolución disponibles.

Para la revisión y edición del mapa de restauración se recomienda utilizar la aplicación ThRasE¹⁸ de QGIS, que permite revisar y editar los mapas en formato **raster**, desplegando todos los insumos disponibles simultáneamente en ventanas individuales. ThRasE hace parte del paquete de aplicaciones diseñadas por el SMBYC para generar la información de la superficie y cambios de superficie del bosque (figura 17).

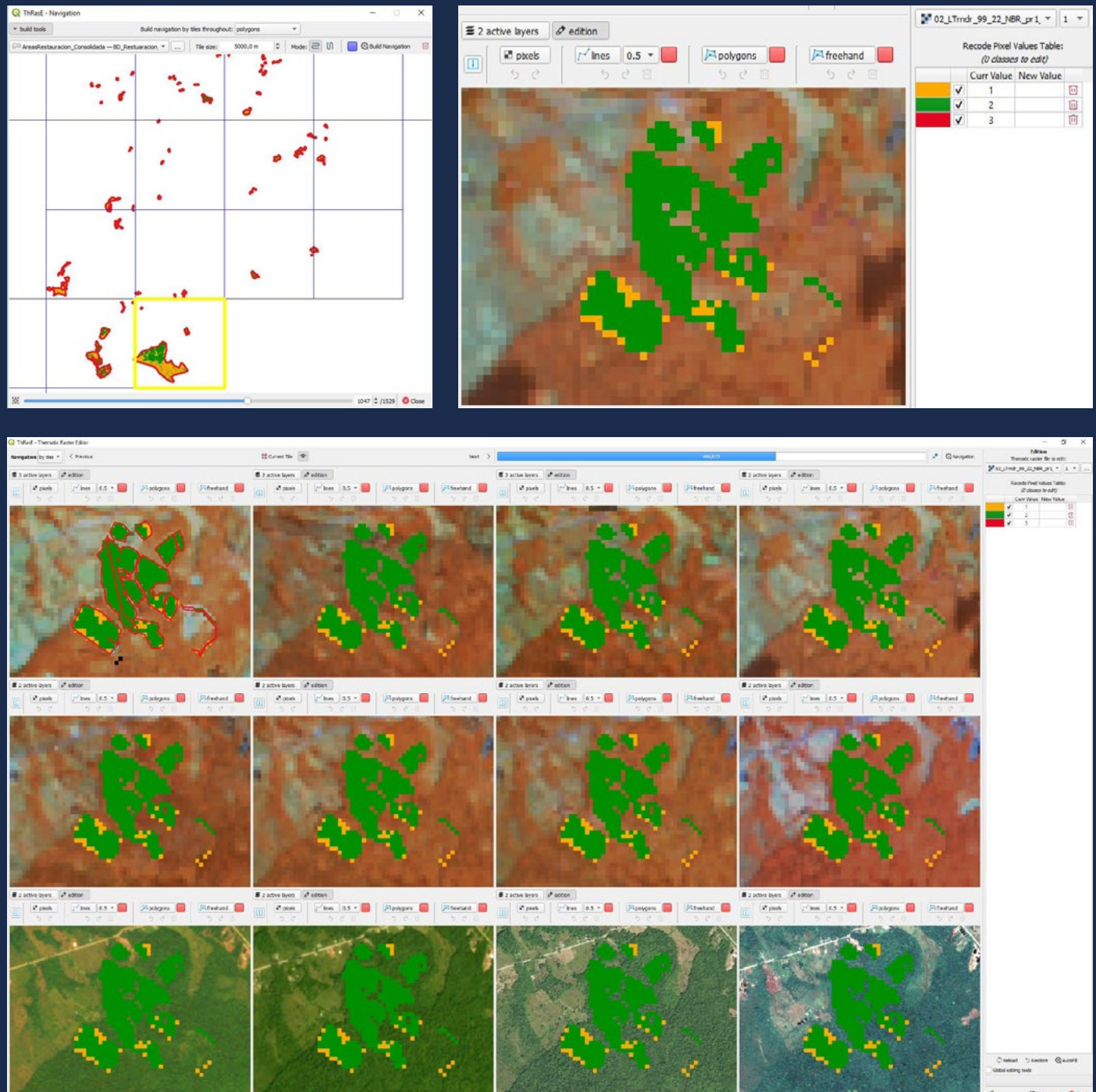
A partir de los resultados de la evaluación de la exactitud temática de la capa ajustada (Etapa 3), se recomienda realizar un proceso iterativo de ajuste y evaluación hasta disminuir el error al nivel esperado.

18. <https://smbyc.github.io/ThRasE/>

NIVEL NACIONAL

Figura 17

Aplicación ThRasE para QGIS, creada por el SMBYC para la revisión y edición de mapas temáticos en formato *raster*, recomendada para el ajuste de los resultados obtenidos con el análisis de la serie de tiempo



Nota: ThRasE permite visualizar simultáneamente todos los insumos disponibles (imágenes de distintas fechas y sensores), ofreciendo la posibilidad de editar el mapa sobre cualquiera de las imágenes desplegadas (figura inferior). Así mismo, ofrece distintas opciones de navegación sistemática a lo largo del mapa para garantizar que la capa geográfica se revise completamente (figura superior).

Fuente: <https://smbyc.github.io/ThRasE/>



ETAPA 3

EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD TEMÁTICA Y ESTIMACIÓN DE ÁREAS

De acuerdo con las buenas prácticas recomendadas por el IPCC, los datos de los inventarios de emisiones, incluidos los datos de actividad (áreas/superficies) deben cumplir con dos criterios: 1) evitar la sobre o subestimación en la medida en que se pueda evitar y 2) minimizar las incertidumbres tanto como sea posible (GFOI, 2020).

Tomando en cuenta los efectos derivados de los errores de clasificación en los mapas, el cálculo de la superficie a través del conteo directo de los píxeles del mapa no siempre permite satisfacer estos criterios y, por lo tanto, debe evitarse en los reportes. En su lugar, se recomienda que los datos de superficie sean ajustados estadísticamente mediante el uso de un estimador adecuado, calculando los intervalos de confianza asociados como medida de la incertidumbre de la estimación. Para satisfacer estos requerimientos es necesario implementar un muestreo probabilístico diseñado a partir de la información del mapa, en el que sea posible identificar con certeza la cobertura de la tierra presente en cada unidad de muestreo, utilizando información de mayor calidad (p. ej.: datos de terreno o imágenes de satélite de alta resolución). Posteriormente, con la muestra clasificada se estima la exactitud del mapa, el área ajustada y el intervalo de confianza correspondiente, aplicando un estimador acorde con el diseño de muestreo seleccionado, proceso que se realiza en tres fases (Stehman, 2009; FAO, 2016; Olofsson *et al.*, 2013, 2014; Olofsson, 2018; GFOI, 2020):

1

Diseño de muestreo: es decir, el protocolo con el cual se selecciona la muestra de referencia con la que se evalúa el mapa y se estima el área. En este paso se define el marco muestral, la unidad

de muestreo (píxel, grupo de píxeles, polígonos), el tamaño de muestra y se selecciona el diseño del muestreo probabilístico que se implementa:



Muestreo aleatorio simple.



Muestreo sistemático.



Muestreo estratificado.



Muestreo en dos etapas y por conglomerados.

Seleccionar el diseño de muestreo implica realizar una evaluación de costos-beneficios a partir de los objetivos, las características de los datos y las prioridades: un diseño estratificado se suele utilizar para incrementar la asignación de la muestra dentro de áreas geográficas de interés o clases del mapa relativamente pequeñas o raras, con el propósito de tener una mejor estimación de la exactitud de usuario y productor para estas clases o regiones, incrementando la precisión de las estimaciones (Stehman, 2009; Olofsson *et al.*, 2014; FAO, 2016).

En un diseño sistemático las muestras se encuentran espacialmente balanceadas, reduciendo el problema de la correlación espacial (FAO, 2016; Olofsson *et al.*, 2014; Olofsson, 2018), por lo que todas las áreas tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas; adicionalmente, este diseño permite establecer un estudio longitudinal que evalúa las mismas unidades de muestreo en cada nuevo periodo de análisis (FAO, 2023). Sin embargo, al igual que el muestreo aleatorio simple, puede requerir de una muestra más grande que la del muestreo

NIVEL NACIONAL

estratificado para lograr el mismo nivel de incertidumbre y es difícil tener muestras de coberturas o eventos raros o de área pequeña (Olofsson, 2021).

Por su parte, los muestreos por clúster permiten disminuir los costos al reducir la extensión de las muestras, si bien los análisis pueden ser más complejos y la correlación espacial entre las unidades de un mismo conglomerado a menudo reduce la precisión de las estimaciones en comparación con un muestreo aleatorio simple de igual tamaño (Olofsson *et al.*, 2014; Olofsson, 2018).

2

Diseño de respuesta: establece la metodología y los criterios para clasificar las muestras, incluidas las fuentes de información, el protocolo de etiquetado para la clasificación de cada muestra y la definición de concordancia entre la muestra de referencia y el mapa (FAO, 2016).

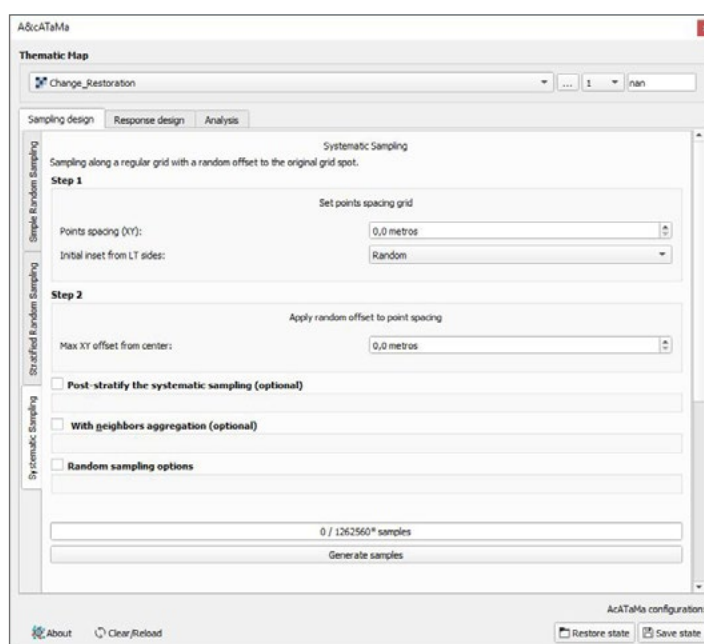
3

Análisis: determina la forma de cuantificar la exactitud, la estimación del área y la incertidumbre (FAO, 2016).

En esta etapa se recomienda utilizar la aplicación de QGIS AcaTaMa¹⁹, una herramienta desarrollada por el SMBYC para realizar la evaluación de exactitud temática y la estimación de áreas de los datos del monitoreo de bosques generados por el Ideam. La aplicación incorpora las tres fases del proceso, tiene la opción de aplicar diseños de muestreo aleatorio simple, estratificado y sistemático (figura 18), permite visualizar simultáneamente los distintos insumos de imágenes de satélite para clasificar cada muestra de referencia (figura 20) y genera los resultados del análisis con los estimadores adecuados para cada diseño de muestreo.

Figura 18

Funcionalidades de la aplicación AcaTaMa en QGIS, diseñada por el SMBYC para la evaluación de exactitud temática y los estimadores de área, que permite desarrollar las tres etapas del proceso: diseño de muestreo, diseño de respuesta y análisis



Fuente: aplicación AcaTaMa para QGIS.

¹⁹ <https://github.com/SMBYC/AcaTaMa> y <https://plugins.qgis.org/plugins/AcaTaMa/>



DISEÑO DE MUESTREO

Para la evaluación de exactitud y la estimación de las áreas con evidencia de restauración se propone utilizar un diseño de muestreo sistemático con una muestra permanente que se incrementa en cada nuevo periodo de monitoreo. En el diseño sistemático la muestra se encuentra espacialmente balanceada, reduciendo el problema de la correlación espacial (Stehman, 2009; FAO, 2016; Olofsson *et al.*, 2014; Olofsson, 2018). En la medida en que se mejoren los reportes se esperaría que las clases de ganancia de cobertura leñosa o del bosque no fueran clases raras o muy reducidas en el mapa respecto a las áreas sin cambio, una de las razones para utilizar un muestreo estratificado (FAO, 2016, Olofsson *et al.*, 2014).

Por su parte, el carácter permanente del muestreo (estudio longitudinal) permitirá evaluar las mismas unidades en cada periodo de análisis, adicionando las muestras correspondientes a las nuevas áreas reportadas. Este seguimiento permanente para el monitoreo de la restauración del bosque y de otras coberturas forestales presenta las siguientes ventajas y posibilidades:

- Permite tener el contexto temporal y temático de cada unidad mediante la observación de la serie de imágenes históricas, facilitando la tarea de identificar si efectivamente se ha producido un cambio y en qué momento se registra, dando lugar a una clasificación de referencia de mayor exactitud (Stehman y Foody, 2019) y con una mejor consistencia temática. Esta ventaja resulta especialmente útil en el seguimiento de los cambios continuos y graduales que tienen lugar durante el proceso de restauración. El uso de herramientas como AcaTaMa (figura 20) potencia las posibilidades de realizar el seguimiento histórico de las muestras.
- Resulta útil cuando el proceso de cambio es cíclico (p. ej.: pérdidas seguidas de ganancias), permitiendo capturar esta dinámica en las uni-

dades de muestreo (Stehman y Foody, 2019). Al tener la trayectoria histórica para cada unidad de muestreo es posible calcular, por ejemplo, el tiempo de crecimiento de la vegetación leñosa y el bosque, o los tiempos de permanencia.

- Facilita la incorporación de datos de campo, ya qué, cómo se señala en el diseño de respuesta, se recomienda incluir paulatinamente información tomada en el terreno para una porción de la muestra.
- Permite compartir las unidades de muestreo con las entidades para realizar un muestreo participativo de acuerdo con un protocolo establecido para tal fin.

Para determinar el tamaño de muestra (n) con un diseño sistemático (o aleatorio simple) se utiliza la fórmula de Cochran (1977), que se puede resolver de acuerdo con Olofsson (2021)²⁰:

Ecuación 1 y 2

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

$\hat{p}$ = exactitud global del mapa objetivo o anticipada (es desconocida, por lo tanto se debe asignar de manera preliminar según criterios objetivos y los conocimientos previos), expresada como un valor entre 0 y 1.

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

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

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

20. https://www.openmrv.org/es/w/modules/mrv/modules_3/simple-random-systematic-sampling

NIVEL NACIONAL

Una vez definido el tamaño de muestra se implementa el muestreo para obtener el (n) deseado. En este paso resulta conveniente utilizar una muestra mayor al tamaño mínimo establecido, de forma que sea posible realizar una post-estratificación o desagregación temporal, temática o geográfica de la muestra, para el cálculo de las áreas asociadas. Igualmente, es altamente recomendable utilizar la función de “semilla” (*Automatic random seed*) de AcATaMa o una función equivalente durante el diseño del muestreo (figura 19), la cual permite reproducir posteriormente el muestreo, utilizando los mismos parámetros y el

valor de la semilla asignado, en aras de la transparencia y replicabilidad del proceso. Para las nuevas áreas reportadas en cada periodo de análisis, se deberán seleccionar las muestras utilizando el mismo diseño y parámetros, incorporado las unidades obtenidas al muestreo de referencia. Se sugiere utilizar un muestreo sistemático con distancias aleatorias variables (figura 19), teniendo en cuenta que en las pruebas realizadas este diseño resultó más efectivo para incluir muestras en una mayor cantidad de áreas (polígonos), comparado con los muestreos sistemáticos de distancia fija y aleatorios simples.

Figura 19

Opciones del muestreo sistemático en la aplicación AcATaMa para QGIS

Nota: En el recuadro rojo superior se resaltan las opciones para un muestreo sistemático de distancia fija o aleatoria variable. El recuadro rojo inferior resalta las opciones de semilla para replicar el muestreo sistemático diseñado.

Fuente: Aplicación AcATaMa para QGIS.



DISEÑO DE RESPUESTA

El protocolo del diseño de respuesta define la forma en la que se interpretan o clasifican las unidades de muestreo utilizando los datos de referencia (imágenes de satélite o campo), obteniendo así la muestra o clasificación de referencia (Stehman y Wickham, 2011). Estas unidades son comparadas con el mapa evaluado para determinar la coincidencia e inferir los parámetros de exactitud y área con los estimadores correspondientes (Olofsson, 2018). Los lineamientos para llevar a cabo el diseño de respuesta son:



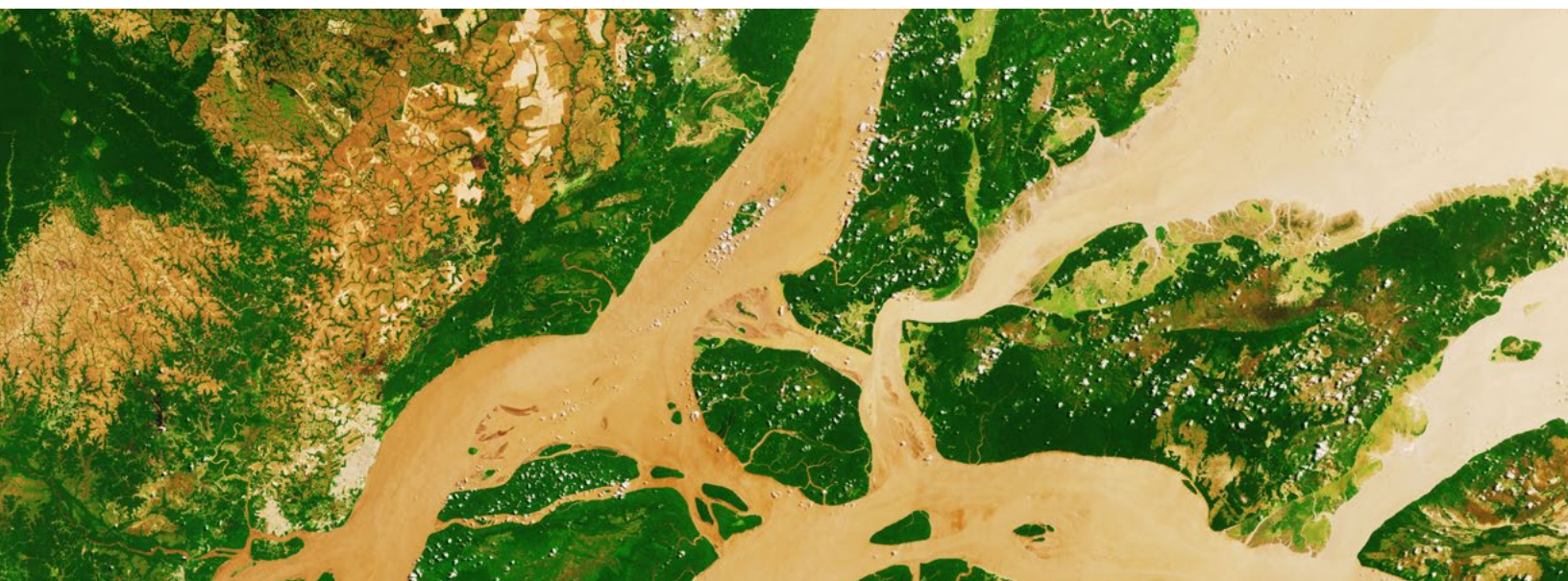
Unidad espacial de observación o evaluación: se sugiere utilizar como unidad de evaluación las mismas unidades del mapa, es decir, el píxel de 30 m que coincide con el punto del muestreo, lo que facilita establecer la concordancia entre el mapa evaluado y la unidad de evaluación (Stehman y Wickham, 2011). Sin embargo, no siempre resulta fácil clasificar un único píxel, especialmente cuando se usan imágenes de mediana resolución como fuente de referencia, por lo que, a manera de contexto y apoyo, se recomienda analizar los 8 píxeles circundantes durante el proceso.



Datos de referencia: la clasificación de referencia debe ser de mayor calidad que la clasificación del mapa, por lo que es importante seleccionar adecuadamente los insumos para clasificar la muestra. En el caso de las imágenes de satélite, este requisito se garantiza de dos formas: con imágenes de mayor calidad que las empleadas para generar el mapa (p. ej.: mejor resolución espacial) o, si se usan las mismas imágenes, el proceso de clasificación de las unidades de evaluación debe ser más preciso que el proceso de elaboración del mapa (Olofsson *et al.*, 2013, 2014; Olofsson, 2018; FAO, 2016). En la evaluación del mapa de restauración del bosque se recomienda emplear las dos estrategias.



Imágenes de mayor resolución: se recomienda utilizar todas las fuentes disponibles, siempre y cuando se conozca la fecha de la toma y se encuentre dentro del intervalo temporal evaluado, p. ej.: el repositorio de imágenes de Google, Planet Scope (desde 2016), Sentinel 2 (desde 2015). En el marco del SMByC resulta recomendable adquirir servicios de consulta de imágenes de alta resolución que sean de utilidad para el resto de los procesos de monitoreo.



Fotografía: Río delta del Amazonas / lavizzara / www.shutterstock.com



NIVEL NACIONAL



Imágenes Landsat: no siempre se cuenta con imágenes de mejor calidad para evaluar las unidades de observación, especialmente en la línea base histórica, siendo necesario emplear los mismos insumos con los que se generó el mapa. En este caso se considera que la interpretación visual de la unidad de la muestra por intérpretes expertos es más precisa que la clasificación obtenida por un algoritmo (Olofsson *et al.*, 2014).



Datos de campo: en el caso del monitoreo de un proceso complejo como la restauración del bosque, los datos de campo pueden considerarse una fuente de mejor calidad que los obtenidos por imágenes puesto que las visitas a terreno resultan efectivas para evaluar las coberturas estables y cambios lentos y graduales (Cohen, 2010, en Olofsson *et al.*, 2014). Con un diseño sistemático permanente se busca implementar paulatinamente, en el corto y mediano plazo, visitas de campo que permitan evaluar una proporción de la muestra de referencia (p. ej.: 1 % de la muestra total), realizando un seguimiento en



Asignación de etiquetas: para cada unidad de observación se debe asignar la etiqueta de la clase observada en los datos de referencia. AcaTaMa permite visualizar simultáneamente todos los insumos de imágenes de satélite disponibles para clasificar la muestra y tiene la funcionalidad de desplegar en Google Earth el punto de la muestra para utilizar el catálogo de esta plataforma, facilitando el proceso de identificación de la clase correspondiente (figura 20). En la clasificación se utilizan como etiquetas las clases del mapa obtenido a partir del análisis de las series de tiempo, que se describen en la tabla 5:

Tabla 5

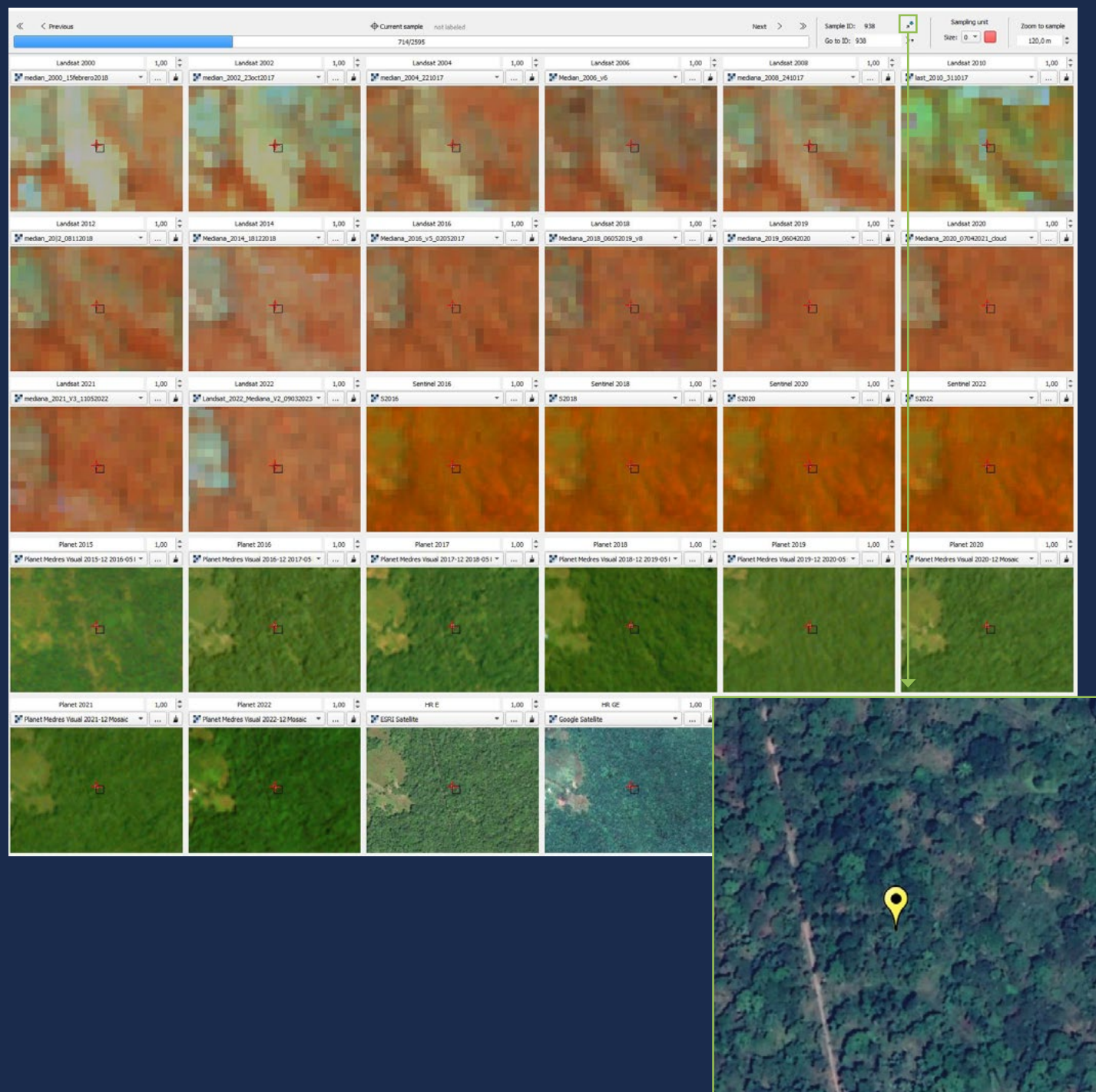
Etiquetas utilizadas para clasificar las unidades de observación del muestreo en la evaluación de exactitud temática y la estimación de áreas ajustadas

LÍNEA BASE HISTÓRICA	PERIODO DE MONITOREO
Sin ganancia (SG).	Sin ganancia (SG).
Ganancia de vegetación leñosa (GVL).	Ganancia de vegetación leñosa (GVL).
Ganancia de bosque (GB).	Ganancia de bosque (GB).
	Persistencia de vegetación leñosa o bosque (ganada en periodos anteriores) (PVL/B).
	Pérdida de vegetación leñosa o bosque (ganada en periodos anteriores) (LVL/B).

Fuente: elaboración propia.

Figura 20

Ventana de clasificación de las unidades del muestreo en AcATaMa para QGIS utilizando las imágenes de satélite disponibles para el periodo de análisis



Nota: En el ejemplo se incluyen los compuestos anuales con el valor de la mediana de las imágenes Landsat elaborados por el SMByC, compuestos anuales de imágenes Sentinel 2, imágenes Planet Scope y otros insumos de alta resolución, incluidas las imágenes disponibles en el servicio Securewatch (Maxar). La herramienta se conecta con la plataforma de Google Earth para revisar las imágenes históricas disponibles.
Fuente: elaboración propia.

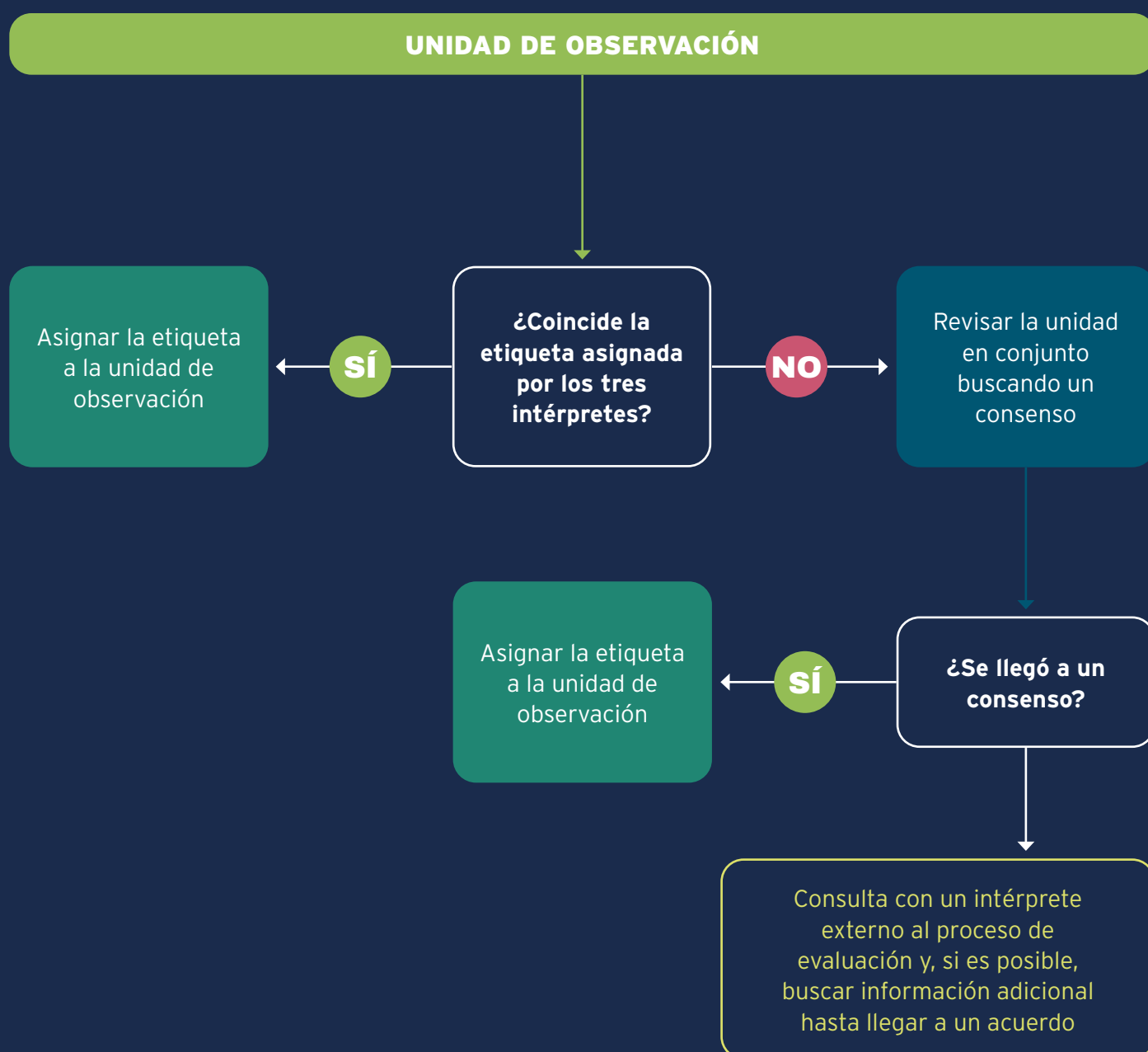
NIVEL NACIONAL

Teniendo en cuenta que el resultado de la clasificación de referencia puede variar de acuerdo con la experiencia y el esfuerzo del intérprete (Olofsson *et al.*, 2018), la muestra total deberá ser clasificada por tres intérpretes expertos de manera independiente. Posteriormente, se comparan las clases o

etiquetas asignadas, revisando conjuntamente las unidades en las que existe desacuerdo entre en la etiqueta asignada por los distintos intérpretes, hasta encontrar un consenso en la clase que se debe asignar, siguiendo el proceso indicado en la figura 21.

Figura 21

Metodología para asignar la etiqueta o clase a las unidades de observación, en los casos en que se presenta desacuerdo entre las clases asignadas por los distintos intérpretes



Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS

En el análisis se contrasta la clasificación de referencia con las clases temáticas del mapa para cada unidad de muestreo mediante una matriz de error en términos de proporción de área. A partir de estos resultados se aplican los estimadores de exactitud y de áreas para las clases de interés.



Construcción de la matriz de error: la matriz se construye como una tabulación cruzada de las etiquetas de clase del mapa versus los datos de referencia clasificados. La diagonal de la matriz registra el número de unidades (n_{ij}) en las que coinciden las etiquetas del mapa y la clasificación de referencia, mientras que los elementos no diagonales muestran los errores de omisión y comisión.

		CLASIFICACIÓN DE REFERENCIA				
		CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	CLASE J	TOTAL
MAPA	Clase 1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	$\dots n_{1j}$	n_{1+}
	Clase 2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	$\dots n_{2j}$	n_{2+}
	Clase 3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	$\dots n_{3j}$	n_{3+}
	...Clase i	$\dots n_{i1}$	$\dots n_{i2}$	$\dots n_{i3}$	$\dots n_{ij}$	n_{i+}
	Total	n_{+1}	n_{+2}	n_{+3}	n_{+j}	n

Posteriormente, los valores de n_{ij} se transforman en proporciones de área (p_{ij}) para cada celda, utilizando el valor de la proporción de superficie de cada clase i del mapa (W_i), con la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$p_{ij} = W_i * \left(\frac{n_{ij}}{n_{i+}} \right)$$

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.

Cálculo de la exactitud temática: los estimadores de la exactitud global, usuario y productor se calculan de acuerdo con Olofsson *et al.* (2013, 2014) y Stehman y Foody (2019).

El estimador de la exactitud global ($\hat{O}$), definida como el grado en el cual el mapa concuerda con una clasificación de referencia, se calcula a partir de la matriz de error con los valores de proporciones de área (p_{ij}), utilizando la siguiente fórmula (Olofsson *et al.*, 2013, 2014; Stehman y Foody, 2019):

Ecuación 4

$$\hat{O} = \sum p_{ij}$$

p_{ij} = 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, los valores que se encuentran en la diagonal de la matriz de error de proporciones de área.



NIVEL NACIONAL

La exactitud de usuario de la clase i ($\hat{U}_i$) representa la proporción de la superficie cartografiada en una clase determinada que realmente corresponde a esa clase en el terreno, donde la clasificación de referencia representa la “verdad del terreno”, $\hat{U}$ se asocia a los errores de comisión (Olofsson *et al.*, 2013).

Ecuación 5

$$\hat{U}_i = \frac{p_{ij}}{p_{i+}}$$

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

p_{ij} = 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, los valores que se encuentran en la diagonal de la matriz de error de proporciones de área.

La exactitud de productor de la clase j ($\hat{P}_j$) representa la proporción de la superficie de la clase j en el terreno, asignada a la misma clase en el mapa. Está asociada a los errores de omisión (Olofsson *et al.*, 2013).

Ecuación 6

$$\hat{P}_j = \frac{p_{ij}}{p_{+j}}$$

p_{+j} = proporción de la superficie total de la clase j en el terreno, obtenida de las columnas de la matriz.

p_{ij} = 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, los valores que se encuentran en la diagonal de la matriz de error de proporciones de área.

Estimadores de área

En los reportes de cambios de cobertura, la estimación del área puede ser incluso más importante que la evaluación de exactitud y requiere de un estimador insesgado y apropiado para el diseño de muestreo utilizado. El estimador de la media y la varianza para los muestreos aleatorios simples y sistemáticos son los siguientes (Olofsson, 2018; GFOI, 2020):

Ecuación 7

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

Ecuación 8

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

Donde i representa cada una de las unidades de la muestra (n), e y_i es la i -ésima observación de la muestra de referencia.

El resultado $\hat{\mu}$ de se transforma en unidades de superficie a partir de las áreas del mapa y con la varianza se calcula el intervalo de confianza como una medida de la incertidumbre. El área estimada se reporta junto con el intervalo de confianza asociado. La aplicación AcATaMa ha incorporado las fórmulas para los cálculos y estimaciones de exactitud, áreas e intervalo de confianza para cada diseño de muestreo.

Estimación de áreas (superficies) desagregadas temporal, temática o espacialmente

Es posible utilizar la muestra de referencia para estimar la superficie con ganancia de vegetación leñosa y bosque de manera desagregada por subregiones geográficas, clases temáticas o temporales, bien sea por post-estratificación o por tipificación de la muestra.

NIVEL NACIONAL

Una de las aproximaciones para el caso de la tipificación es la propuesta por Molinario *et al.* (2020), que permite calcular las proporciones, estimaciones de área y error estándar, siendo necesario asignar la unidad o tipología correspondiente a cada una de las muestras de la clasificación de referencia.

1

Cálculo de la proporción y estimación del área para cada tipología o unidad de la desagregación (t):

Ecuación 9 y 10

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

P_t = proporción de la muestra que pertenece a la tipología o unidad de desagregación t.

n_t = número de muestras que pertenecen a la tipología o unidad de desagregación t (p. ej.: número de muestras clasificadas con ganancia de bosque/VL tipificadas en cierta unidad de desagregación).

n = número total de muestras.

A_{tot} = área total del mapa.

2

Error estándar del área estimada para la clase de interés (ganancia bosque/VL) en el periodo t:

Ecuación 11

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

$SE(A_t)$ = error estándar del área estimada para la clase de interés t.

P_t = proporción de la muestra que pertenece a la tipología o unidad de desagregación t..

n = número total de muestras.

A_{tot} = área total del mapa.

A partir del área estimada y el error estándar se construye el intervalo de confianza como medida de la incertidumbre para reportar los datos de superficie de cada tipología o unidad de desagregación.

Es posible aplicar este análisis en la estimación de las áreas (superficies) desagregadas geográfica, temporal o temáticamente, siempre y cuando cada unidad desagregada cuente con un número robusto de muestras, ya que el error estándar decrece como una función del tamaño de la muestra (Molinario *et al.*, 2020).

Para el caso de la post-estratificación pueden evaluarse el uso de aproximaciones como las propuestas por Stehman (2013).





ETAPA 4

REPORTE DE LOS RESULTADOS



Universo de estudio: el monitoreo de la superficie de bosque natural se realiza en las áreas con actividades de restauración potencial a bosque reportadas y recopiladas que se encuentran en el territorio continental, costero e insular de San Andrés y Providencia. El universo de estudio es variable en la medida que se incorporan nuevas áreas de proyectos de restauración en cada periodo de análisis.



Cubrimiento geográfico: la implementación del *Protocolo de monitoreo de la restauración de bosques* permite presentar información de las áreas reportadas con acciones de restauración en el territorio colombiano, continental e insular de San Andrés y Providencia.



Desagregación geográfica: los resultados tienen un cubrimiento de la superficie continental del país e insular de San Andrés y Providencia, y se desagregan geográficamente por regiones naturales: Amazonia, Orinoquia, Andes, Caribe y Pacífico, para lo cual se utilizan los límites usados en el monitoreo de la superficie de bosque del SMByC.



Periodo de referencia: la línea base histórica se realiza para el periodo 2007-2022. El seguimiento se realiza anualmente desde 2023.



Periodo de recolección: la recopilación de las nuevas áreas y la implementación del monitoreo de la restauración de la cobertura de bosque se realiza en el primer semestre del año siguiente al del periodo monitoreado.

INDICADORES DE REPORTE

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

Superficie total (ha) reportada con procesos de restauración potencial a bosque²¹ acumuladas hasta el periodo de análisis (t), que han sido recopiladas, ajustadas y filtradas de acuerdo con lo establecido en el protocolo (véase Etapa 1).

Estas áreas se monitorean acumulativamente, es decir, se realiza el seguimiento de las áreas recopiladas en los (n) años anteriores, adicionando los polígonos reportados para cada nuevo periodo de análisis (t).

I 21. De acuerdo con la definición de bosque adoptada para el país.



NIVEL NACIONAL

El indicador se calcula como:

Ecuación 12

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

$SRB_{(t-n,t)}$ = superficie (ha) reportada con procesos de restauración potencial a bosque, acumulada al periodo de análisis (t).

arb = superficie (ha) de las áreas con procesos de restauración potencial a bosque reportados y recopilados desde el inicio de la línea base hasta el periodo de análisis (t).

Ecuación 13

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

$TG_{(t-n,t)}$ = superficie (ha) con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) acumulada hasta el periodo de análisis (t).

$G_{(t)}$ = superficie (ha) con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) detectada en el periodo de análisis (t).

$pG_{(t-1,t)}$ = superficie (ha) con evidencia en la persistencia de la restauración, es decir, la superficie con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) acumulado hasta el periodo anterior (t-1) que permanece en el periodo (t). Se calcula como:

Ecuación 14

$$pG_{(t-1,t)} = TG_{(t-1)} - D_{(t)}$$

$TG_{(t-1)}$ = superficie (ha) con evidencia de restauración a bosque (VL + B), acumulada hasta el periodo de análisis anterior (t-1).

$D_{(t)}$ = superficie (ha) con evidencia de restauración a bosque (VL + B), acumulada hasta el periodo de análisis anterior (t-1) que se pierde en el periodo de análisis (t).

La superficie reportada en proceso de restauración del bosque cambia en cada nuevo periodo de análisis al incluir las nuevas áreas reportadas o al realizar ajustes en las áreas reportadas en periodos anteriores.

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

Corresponde a la superficie (ha) con evidencia de ganancia de vegetación leñosa (VL) y bosque (B) acumulada al periodo de análisis (t), que tiene lugar dentro de la superficie reportada en proceso de restauración del bosque. Se incluye como parte del indicador la ganancia de VL, teniendo en cuenta que esta cobertura estaría presente en las primeras etapas del proceso de restauración antes de que se alcance la cobertura de bosque.

La superficie con evidencia de restauración a bosque se reporta acumulativamente, es decir, se incluye la superficie ganada en los periodos anteriores que permanece en el periodo de análisis (t), junto con las nuevas superficies de ganancia detectadas en el periodo (t). El indicador se calcula como:

Se recomienda acompañar el indicador con el porcentaje de la superficie que corresponde específicamente a la ganancia de cobertura de bosque en el periodo de análisis.

No se recomienda calcular el indicador de manera separada para cada cobertura (VL y B) ya que, en el caso de la vegetación leñosa, la persistencia de la superficie ganada en periodos anteriores depende de dos factores: la pérdida de la vegetación leñosa ganada (lo que indica un retroceso en el proceso de restauración) o el



paso de vegetación leñosa a bosque (que corresponde a un proceso de restauración en curso). Al reportarse de manera integrada se tiene en cuenta la superficie total con evidencia de restauración en curso.

REPORTE DE LOS RESULTADOS

Información mínima que se deben incluir en el reporte de los resultados:



Superficie reportada en proceso de restauración a bosque:

- Superficie reportada en proceso de restauración del bosque: se presenta el valor acumulado hasta el periodo reportado (áreas anteriores y áreas nuevas).
- Número de áreas (polígonos) reportados y recopilados con procesos de restauración potencial a bosque utilizados en el monitoreo.
- Superficie (ha) reportada con procesos de restauración potencial a bosque por región natural.
- Número de áreas (polígonos) reportados con procesos de restauración potencial a bosque por región natural.
- Superficie (ha) reportada con procesos de restauración potencial a bosque por estrategia de restauración.
- Número de áreas (polígonos) reportados con procesos de restauración potencial a bosque por estrategia de restauración.



Superficie con evidencia de restauración a bosque:

- Superficie (ha) acumulada con ganancia de vegetación leñosa o bosque e intervalo de confianza estimado (incluir tamaño de la muestra para la estimación).

- Porcentaje de la superficie con ganancia que corresponde a cobertura de bosque.
- Persistencia (%) de la restauración a bosque (VL + B) acumulada hasta el periodo anterior que permanece en el periodo de análisis.
- Exactitud temática del mapa.
- Superficie (ha) acumulada con ganancia de vegetación leñosa o bosque por región natural.

Adicionalmente, para facilitar la comprensión e interpretación de los resultados, el reporte debe ir acompañado de una ficha o síntesis de la metodología en la que se incluya:

- Objetivo y alcance del reporte.
- Conceptos y definiciones asociadas al reporte.
- Periodo del reporte.
- Cobertura y desagregación geográfica del reporte.
- Fuentes de datos e insumos.
- Resumen de la metodología usada para generar el reporte, incluidas las etapas de recopilación y estructuración de las áreas con procesos de restauración, generación del mapa de restauración del bosque y la vegetación leñosa y procesos utilizados para el muestreo estadístico con el que se evalúa la exactitud temática y se estiman las áreas ajustadas.
- Indicadores reportados y fórmulas usadas para el cálculo.

En el anexo 3 se presenta la estructura propuesta para los reportes de resultados.



CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL REPORTE DE LAS ÁREAS CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN

Teniendo en cuenta que el monitoreo se realiza dentro de las áreas reportadas y recopiladas con procesos de restauración, los resultados dependen en gran medida de la disponibilidad y del acceso a información completa, oportuna y de calidad. En este sentido, la operatividad del módulo de monitoreo de la restauración del bosque dependerá de la articulación eficaz entre las entidades y grupos que tienen a cargo el establecimiento, seguimiento y reporte de las áreas en restauración y la recopilación y difusión de la información.

El módulo de monitoreo de la restauración, como parte del SMyC, debe establecerse en un marco de interoperabilidad y trabajo conjunto con los sistemas que recopilan información de las áreas implementadas, de manera que se logre un acceso oportuno a la información para realizar el monito-

reo y el análisis de los datos. Así mismo, para lograr contar con reportes a nivel nacional comparables y verificables, es necesario estandarizar y unificar las fuentes de datos disponibles, de forma que los reportes y resultados presentados por las distintas entidades sean coherentes entre sí.

Como parte del proceso de construcción del protocolo, el 10 de noviembre de 2022 se llevó a cabo un taller con entidades responsables de la implementación, reporte y recopilación de información de restauración. El taller contó con la participación de Minambiente, de los institutos de investigación y las agencias adscritas al Ministerio, Parques Nacionales Naturales, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), FAO y las subdirecciones de Ecosistemas e Información Ambiental y Estudios Ambientales del Ideam. Dentro de las

NIVEL NACIONAL

acciones identificadas y propuestas por las entidades del sector para mejorar el reporte de la información se incluyen:

- Establecer incentivos y mejorar la normatividad para incrementar los reportes y definir los aspectos técnicos asociados que permitan garantizar el seguimiento de las acciones de restauración. Actualmente, solo las CAR y la ANLA tienen la obligación de reportar las áreas en restauración.
- Mejorar la definición de roles y estrategias para recopilar, consolidar y centralizar la información de la restauración a nivel nacional de manera ágil y oportuna.
- Fortalecer las capacidades de las entidades que recopilan, reportan o hacen seguimiento de las áreas de restauración.
- Mejorar las herramientas de reporte de los datos, facilitando el cargue de la información, especialmente cuando es necesario reportar volúmenes considerables de áreas con iniciativas de restauración.
- Definir los términos y conceptos asociados a la restauración para lograr que todos los actores hablen el mismo lenguaje hace parte fundamental del diseño y la implementación de un sistema de monitoreo de la restauración (Ramírez y Morales, 2021), la complejidad conceptual del tema generalmente conlleva que exista una confu-

sión sobre el significado ecológico y práctico de conceptos como el de restauración ecológica, rehabilitación, recuperación y otros términos asociados como reforestación o revegetalización (Murcia *et al.*, 2017).

Teniendo en cuenta que los perfiles de los actores que reportan la información pueden ser variados, es necesario estandarizar los conceptos y las definiciones asociadas a los reportes de las áreas, incluidos los enfoques y estrategias, para facilitar a los usuarios expertos y no expertos diligenciar los reportes adecuadamente.

Se sugiere que se agreguen un diccionario de datos y manuales en las herramientas de recolección de las áreas, explicando de manera sencilla y con ejemplos a que hace referencia cada una de las estrategias y atributos que deben ser incorporados en los registros.

- Diseñar protocolos de control de calidad de la información, incluyendo estrategias para evitar la duplicidad de la información reportada por más de una agencia o entidad y mecanismos de validación de la información cargada en las plataformas.
- Llenar vacíos normativos respecto a las áreas y figuras de restauración, especialmente las asociadas a las plantaciones protectoras y protectoras-productoras, que se han incorporado actualmente como estrategias de rehabilitación.



Fotografía: Taller para el diseño de protocolo de monitoreo de la restauración del bosque / GGGI



INFORMACIÓN DE ÁREAS CON PROCESOS DE INFORMACIÓN RECOPIADAS PARA EL DISEÑO DEL PROTOCOLO Y RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LOS REPORTES

Para el periodo de la línea histórica se recopilieron **ca.** 260.000 hectáreas de áreas con procesos de restauración potencial a bosque. Adicionalmente, se registraron **ca.** 163.000 hectáreas de restauración a otras coberturas forestales (cercas vivas, agroforestales, silvopastoriles) y **ca.** 2.790.000 hectáreas reportadas bajo estrategias de manejo forestal sostenible y herramientas del paisaje, que pueden ser monitoreadas de manera similar a la

restauración del bosque. Entre 2000 y 2006 se registraron menos de 50 áreas con procesos de restauración, por esta razón la línea base histórica se construyó para el periodo 2007-2022.

Dentro del proceso de recolección y consolidación de la base de datos para implementar el protocolo se identificaron las siguientes inconsistencias o aspectos por mejorar:



1

Parte de la información recopilada, especialmente histórica, no cuenta con información geográfica asociada, únicamente registros alfanuméricos.



2

Existen registros geográficos de proyectos de restauración con geometría de puntos (una única coordenada). Estos registros no se pueden monitorear, ya que resulta difícil establecer el área real del proyecto.



3

No siempre se reportan las áreas específicas en las que se implementan las acciones, en muchos casos los registros corresponden a predios completos (no intervenidos en su totalidad) o áreas de proyectos con múltiples acciones (figura 22). El reporte de áreas mayores a las implementadas repercute en los resultados, ya que la superficie con evidencia de ganancias de cobertura forestal será notoriamente inferior a las áreas reportadas.

Figura 22

Ejemplo de un área reportada mayor al área implementada (posiblemente se reportó el límite del predio)



2013



2017

Fuente: Google Earth (19 de diciembre de 2013 y 12 de enero de 2017).



4

Aunque en menor proporción que el caso anterior, también se registraron áreas reportadas donde las imágenes sugieren que el área intervenida es mayor (Figura 23).

Figura 23

Ejemplo de áreas con procesos de restauración en las que los datos de sensores remotos sugieren que el área intervenida es mayor a la reportada



2004



2023

Fuente: Google Earth (20 de enero de 2004 y 28 de agosto de 2023).

NIVEL NACIONAL



5

Los enfoques y estrategias de restauración resultan importantes para generar análisis derivados del monitoreo (p. ej.: estrategias con mejores resultados). Sin embargo, la revisión de los datos mostró que las estrategias no siempre son asignadas adecuadamente (figura 24) o no se registran.

Figura 24

Áreas reportadas con estrategia de revegetalización, que, de acuerdo con la cobertura observada en las imágenes y las especies utilizadas correspondería a una restauración activa o asistida



2004



2022

Fuente: Google Earth (18 de enero de 2004 y 26 de octubre de 2022).



6

No siempre se reporta la fecha de implementación o la fecha reportada no coincide con lo observado en las imágenes (figura 25). Este dato facilita el monitoreo y el seguimiento de las metas.

Figura 25

Ejemplo de un área en la que la fecha de implementación reportada (2021) no coincide con lo observado en las imágenes



2002



2015



2021

Fuente: Google Earth (18 de enero de 2004 y 26 de octubre de 2022).



NIVEL NACIONAL

Aunque la restauración incluye un continuo de actividades para mejorar la salud, la integridad y los servicios ecosistémicos, tanto en ecosistemas naturales como transformados, para realizar el monitoreo resulta importante conocer el objetivo o ecosistema a restaurar. En el caso particular del protocolo, no siempre resulta fácil filtrar las áreas en las que se implementarán acciones de recuperación del bosque natural (sucede lo mismo con otros ecosistemas). En estrategias o acciones como las plantaciones forestales protectoras o áreas reportadas con actividades de reforestación (más común en registros históricos), no siempre es claro si el objetivo es el restablecimiento del bosque natural o si se plantarán individuos arbóreos de especies foráneas o monocultivos con otros fines.

Como resultado de la recopilación, revisión, estructuración y ajuste de las áreas con procesos de restauración para la implementación del protocolo, se plantean algunas recomendaciones clave que permitirán mejorar la información registrada:

1

Reportar únicamente las áreas en las que se realiza la intervención de la restauración. En el caso de estrategias ya establecidas en las aplicaciones de reporte existentes que incluyen distintas acciones o actividades (corredores biológicos, herramientas del paisaje) o en las que se reportan más de una estrategia, se recomienda zonificar o reportar las áreas discriminadas por acciones.

2

Establecer los atributos mínimos como obligatorios en el reporte de las áreas. Para el monitoreo de la restauración con sensores remotos, los atributos mínimos que ya se encuentran en la estructura de las plataformas de recolección de Minambiente y el SNIF son:

- Proyecto.
- Fecha de implementación: inicio de las actividades de restauración.
- Duración proyectada: para la implementación y seguimiento de las actividades de restauración y el monitoreo.
- Programa de monitoreo y duración.

- Enfoque de restauración implementado.
- Estrategia de restauración implementada.
- Especies utilizadas: en caso de que la implementación incluya enriquecimientos y siembra de individuos esto facilita identificar el tipo de ecosistema que se está restaurando.

Existen otros atributos que si bien no son fundamentales para el implementar el protocolo, incrementan el alcance de los análisis para los tomadores de decisiones, por ejemplo, el valor o costo de las acciones de restauración permitiría realizar un análisis de costo-efectividad de las estrategias implementadas.

3

Incluir en las plataformas de reporte de Minambiente y el SNIF los siguientes atributos que no son recopilados actualmente:

- **El ecosistema a restaurar** (sea natural o transformado) para facilitar el filtro de la información y la selección de las áreas para el monitoreo (bosque, agroforestales, silvopastoriles, páramo, sabanas, humedales, cuerpos de agua, arrecifes, etc.).
- **Registro administrativo:** en caso de que sea aplicable, ya que facilita la verificación o el ajuste de las áreas reportadas y la identificación de los objetivos de la implementación.
- **Estado:** si el proceso reportado se encuentra en planeación, en ejecución o ha finalizado.

4

Es necesario que las plataformas registren las actividades silvopastoriles como estrategias independientes dentro del enfoque de rehabilitación, considerando que los aportes en servicios ecosistémicos y, particularmente, en la captura y almacenamiento de carbono son distintos a los obtenidos a partir de otros arreglos agroforestales. Esto permite mejorar las estimaciones y reportes asociados a la mitigación del cambio climático, teniendo en cuenta que la *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)* incluye la implementación de sistemas silvopastoriles intensivos y no intensivos como parte de las NAMAs para la ganadería bovina sostenible (Gobierno de Colombia, 2020).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pág 112.

ANEXOS

Pág 118.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

- Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W. (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Arévalo, P., Bullock, E. L., Woodcock, C. E. y Olofsson, P. (2020b). A Suite of Tools for Continuous Land Change Monitoring in Google Earth Engine. *Frontiers in Climate*, 2, 576740. <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.576740>
- Arévalo, P., Olofsson, P. y Woodcock, C. E. (2020a). Continuous monitoring of land change activities and post-disturbance dynamics from Landsat time series: A test methodology for REDD+ reporting. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111051. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.013>
- Atkinson, J. y Bonser, S. P. (2020), "Active" and "passive" ecological restoration strategies in meta-analysis. *Restoration Ecology*, 28, 1032-1035. <https://doi.org/10.1111/rec.13229>

B

- Banskota, A., Kayastha, N., Falkowski, M. J., Wulder, M. A., Froese, R. E. y White, J. C. (2014). Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40 (5), 362-384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>
- Besseau, P., Graham, S. y Christophersen, T. (eds.). (2018). *Restauración de bosques y paisajes: la clave para un futuro sostenible*. Asociación Mundial para la Restauración del Paisaje Forestal.
- 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>
- Buckingham, K., Ray, S., Gallo Granizo, C., Toh, L., Stolle, F., Zoveda, F., Reyta, K., Zamora, R., Ndunda, P., Landsberg, F., Matsumoto, M. y Brandt, J. (2019). *The Road to Restoration: A Guide to Identifying Priorities and Indicators for*

Monitoring Forest and Landscape Restoration. FAO y World Resources Institute (WRI). <https://www.fao.org/documents/card/es/c/ca6927en>

- Bullock, E. L., Woodcock, C. E. y Holden, C. E. (2020). Improved change monitoring using an ensemble of time series algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.018>

C

- Canty, M. y Nielsen, A. (2008). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1025-1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
- Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. Chapman y Hall/CRC Press.
- Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M., Bongers, F., Almeida, A. M., Aide, T. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H., Craven, D., Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A., de Jong, B., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., Espírito-Santo, M. M., ... Poorter, L. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2 (5), e1501639. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. John Wiley y Sons.
- Congreso de la República de Colombia. (2018, 27 de julio). Ley 1931: por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático. DO: 50.667. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>
- Congreso de la República de Colombia. (2021, 22 de diciembre). Ley 2169: por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones. DO: 51.896. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202169%20DEL%2022%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202021.pdf>

NIVEL NACIONAL

Convention on Biological Diversity (CDB). (2016, 10 de diciembre). *Ecosystem restoration: short-term action plan*. CBD/COP/DEC/XIII/5. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-05-en.pdf>

Cordell, S., Questad, J. E., Asner, G. P., Kinney, K. M., Thaxton, J. M., Uowolo, A., Brooks, S. y Chynoweth, M. W. (2017). Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders. *Restoration Ecology*, 25 (S2), S147-S154. <https://doi.org/10.1111/rec.12448>

D

Dagobert, T., Morel, J. M., Franchis, C. D. y von Gioi, R. G. (2019). Visibility Detection in Time Series of Planetscope Images. En *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019* (pp. 1673-1676). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898892>

Decuyper, M., Chávez, R. O., Lohbeck, M., Lastra, J. A., Tsenbazar, 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>

Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2022). Proyecto tipo: Recuperación de cobertura vegetal en áreas disturbadas. DNP. https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/Coberturavegetal/PT-RECUPERACION-13062022_1.pdf

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: Prosperidad para todos*. DNP.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2015). *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018: Todos por un nuevo país*. DNP.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, pacto por la equidad*. DNP.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). *Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques* (Documento Conpes 4021). DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4021.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022a). *Balance de resultados 2022. Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, pacto por la equidad*. DNP. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Balance_de_resultados_2022_vf.pdf

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022b). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia potencia mundial de la vida*. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-Finversiones-2022-2026.pdf>

F

Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). (2000). *Forests*

reborn: A workshop on forest restoration. En *Proceedings of the WWF/IUCN International Workshop on Forest Restoration*. WWF e IUCN.

G

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. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Gann G. D., Walder B., Gladstone J., Manirajah S. M. y Roe, S. (2022). *Restoration Project Information Sharing Framework*. Society for Ecological Restoration and Climate Focus.

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>

Ghaderpour, E. y Vujadinovic, T. (2020). Change Detection within Remotely Sensed Satellite Image Time Series via Spectral Analysis. *Remote Sensing*, 12(23), 4001. <https://doi.org/10.3390/rs12234001>

Global Forest Observations Initiative (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>

Global Observation for Forest Cover and Land Dynamics (GOFC-GOLD). (2008). *Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting*. GOFC-GOLD Report version COP 13-2. GOFC-GOLD.

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>

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. E. y Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

Guariguata, M. R. y Ostertag, R. (2001). Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 48(1-3), 185-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00535-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00535-1)

H

Hamunyela, E., Rosca, S., Andrei, M., Engle, E., Herold, M., Gieseke, F. y Verbesselt, J. (2020). Implementation of BFAST-monitor Algorithm on Google Earth Engine to Support Large-Area and Sub-Annual Change Monitoring Using Earth Observation Data. *Remote Sensing*, 12(18), 2953. <https://doi.org/10.3390/rs12182953>

NIVEL NACIONAL

- Hanson, C., Buckingham, K., Dewitt, S. y Laestadius, L. (2015). *The Restoration Diagnostic: A Method for Developing Forest Landscape Restoration Strategies by Rapidly Assessing the Status of Key Success Factors*. Versión 1.0. WRI y IUCN.
- Harrison, P., Camarretta, N., Krisanski, S., Bailey, T. G., Davidson, N. J., Bain, G., Hamer, R., Gardiner, R., Proft, K., Taskhiri, M. S., Turner, P., Turner, D. y Lucieer, A. (2021). From communities to individuals: Using remote sensing to inform and monitor Woodland restoration. *Ecological Management y Restoration*, 22(S2), 127-139. <https://doi.org/10.1111/emr.12505>
- Huang, C., Goward, S. N., Masek, J. G., Gao, F., Vermote, E. F., Thomas, N., Schleeweis, K., Kennedy, R. E., Zhu, Z., Eiden-shink, J.C. y Townshend, J. R. G. (2009). Development of time series stacks of Landsat images for reconstructing forest disturbance history. *International Journal of Digital Earth*, 2(3), 195-218. <https://doi.org/10.1080/17538940902801614>
- Huettermann, S., Jones, S., Soto-Berelov, M. y Hislop, S. (2023). Exploring the Influence of Forest Tenure and Protection Status on Post-Fire Recovery in Southeast Australia. *For-ests*, 14(6), 1098. <https://doi.org/10.3390/f14061098>
- Hui, J., Bai, Z., Ye, B. y Wang, Z. (2021). Remote Sensing Monitoring and Evaluation of Vegetation Restoration in Grass-land Mining Areas—A Case Study of the Shengli Mining Area in Xilinhot City, China. *Land*, 10(7), 743. <https://doi.org/10.3390/land10070743>
- I**
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). *Manual de campo. Inventario Forestal Nacional de Colombia*. Ideam y Minambiente.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2019). *Documento Metodológico: Operación Estadística Monitoreo de la Superficie de Bosque Natural en Colombia*. Ideam. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72065174/Documento%20Metodologico%20SMBYC%20Consolidado%20v12%2026062019.pdf>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2018). *The IPBES assessment report on land degradation and restoration*. IPBES.
- K**
- Keay, L., Mulverhill, C., Coops, N. C. y McCartney, G. (2022). Automated Forest Harvest Detection with a Normalized PlanetScope Imagery Time Series. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 49(1) 2154598. <https://doi.org/10.1080/07038992.2022.2154598>
- Kelldorfer, J. (2019). Using SAR Data for Mapping Deforestation and Forest Degradation. En A. I. Flores-Anderson, E. H. Kelsey, R. B. Thapa y E. Cherrington (eds), *The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (pp. 65-170). SERVIR, SilvaCarbon, NASA y USAID.
- Kennedy, R. E., Andréfouët, S., Cohen, W. B., Gómez, C., Griffiths, P., Hais, M., Healey, S. P., Helmer, E. H., Hostert, P., Lyons, M. B., Meigs, G. W., Pflugmacher, D., Phinn, S. R., Powell, S. L., Scarth, P., Sen, S., Schroeder, T. A., Schneider, A., Sonnenschein, R., Vogelmann, J. E., Wulder, M. A. y Zhu, Z. (2014). Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 339-346.
- Kennedy, R. E., Yang, Z. y Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing and Environment*, 114(12), 2897-2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W. B. y Healey, S. (2018). Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(5), 691. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>
- L**
- Lefebvre, D., Williams, A. G., Kirk, G. J. D., Burgess, P. J., Meersmans, J., Silman, M. R., Román-Dañobeytia, F., Farfan, J. y Smith, P. (2021). Assessing the carbon capture potential of a reforestation project. *Nature. Scientific Report*, 11(1), 19907. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99395-6>
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. y Koch, A. (2019). Regenerate natural forests to store carbon. *Nature*, 568, 25-28.
- Liu, C. C., Chen, Y. H., Wu, M. M., Wei, C. y Ko, M. H. (2019). Assessment of forest restoration with multitemporal remote sensing imagery. *Nature: Scientific Reports*, 9(1), 7279. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43544-5>
- Liu, S., Wei, X., Li, D. y Lu, D. (2017). Examining Forest Disturbance and Recovery in the Subtropical Forest Region of Zhejiang Province Using Landsat Time-Series Data. *Remote Sensing*, 9(5), 479. <https://doi.org/10.3390/rs9050479>
- Lohbeck, M., Lebrija-Trejos, E., Martínez-Ramos, M., Meave, J. A., Poorter, L. y Bongers, F. (2015). Functional Trait Strategies of Trees in Dry and Wet Tropical Forests Are Similar but Differ in Their Consequences for Succession. *PLoS ONE* 10(4), e0123741. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123741>
- M**
- Manogaran, G. y López, D. (2018). Spatial cumulative sum algorithm with big data analytics for climate change detection. *Computers y Electrical Engineering*, 65, 207-221. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.04.006>
- Martin, D. (2017). Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. *Restoration Ecology*, 25(5), 668-673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
- Martin, P. A., Newton, A. C. y Bullock, J. M. (2013). Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests. *Proceedings of the Royal Society B*, 280(1773), 20132236. <http://doi.org/10.1098/rspb.2013.2236>

NIVEL NACIONAL

- 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>
- Meli, P., Holl, K. D., Rey Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P.C., Montoya, D. y Moreno Mateos, D. (2017) A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *PLoS ONE*, 12(2), e0171368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*. Minambiente e Instituto Humboldt. http://www.humboldt.org.co/images/pdf/PNGIBSE_espa%C3%B1ol_web.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2015). *Plan nacional de restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*. Minambiente. https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACION%C3%93N_2.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2016). *Política nacional de cambio climático*. Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2017, 10 de octubre). Decreto 1655: por medio del cual se adiciona al Libro 2, Parte 2, Título 8, Capítulo 9 del Decreto número 1076 de 2015, cinco nuevas secciones en el sentido de establecer la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Información Forestal, el Inventario Forestal Nacional y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono que hacen parte del Sistema de Información Ambiental para Colombia, y se dictan otras disposiciones. DO: 50.382. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/decreto-1655-de-2017.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2019, 26 de agosto). Decreto 1532: por medio del cual se modifica la Sección 1 del Capítulo 1 del Título 2 de la Parte 2 del Libro 2 y se sustituye la Sección 12 del Capítulo 1 del Título 2 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076 de 2015, en relación con las plantaciones forestales. DO: 52.116. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/decreto-1532-de-2019.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>
- Murcia, C. y Guariguata, M. R. (2014). *La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades*. Documentos ocasionales 107. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Quintero-Vallejo, E. y Ramírez, W. (2017). *La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: un análisis crítico*. Documentos ocasionales 176. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- ## N
- Norden, N., Angarita, H., Bongers, F., Martínez-Ramos, M., Gran-zow-de la Cerda, Í., van Breugel, M., Lebrija-Trejos, E., Meave, J. A., Vandermeer, J., Williamson, G. B., Finegan, B., Mesquita, R. y Chazdon, R. L. (2015). Successional dynamics in Neotropical forests are as uncertain as they are predictable. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(26), 8013-8018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500403112>
- ## O
- Olofsson, P. (2018). Accuracy and Area Estimation. En S. Liang (ed.), *Comprehensive Remote Sensing* (vol. 6) (pp. 128-135). Elsevier.
- Olofsson, P. (2021). Aleatorio simple/muestreo sistemático. *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>
- Olthof, I., Pouliot, D., Fernandes, R. y Latifovic, R. (2005). Landsat-7 ETM+ radiometric normalization comparison for northern mapping applications. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 388-398. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.024>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Principios para la restauración de los ecosistemas como guía para el Decenio de las Naciones Unidas 2021-2030*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40470/PERG_SP.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Organización de las Naciones Unidas (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. ONU.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Map accuracy assessment and area estimation: A Practical Guide. National forest monitoring assessment*. Working Paper 46. FAO.

NIVEL NACIONAL

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Restauración de bosques y paisajes. Nota de la Secretaría*. 31.ª reunión de la Comisión Forestal para América Latina y el Caribe. <http://www.fao.org/3/ca5677es/ca5677es.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Documento de posición sobre "restauración de los ecosistemas" relativo a los ecosistemas de producción, en el contexto del decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (2021-2030)*. 25.º periodo de sesiones del Comité Forestal. <http://www.fao.org/3/nd651es/nd651es.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). *Introducción a la estimación del cambio de área forestal*. Curso electrónico: Monitoreo de bosques y tierras para la acción climática. SEPAL-FAO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Comisión de Gestión de Ecosistemas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (CGE UICN) y Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER). (2021). *Principios para la restauración de los ecosistemas como guía para el Decenio de las Naciones Unidas 2021-2030*. FAO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2022). *Global indicators for monitoring ecosystem restoration - A contribution to the UN Decade on Ecosystem Restoration*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9982en>

P

Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC.

Pasquarella, V. J., Arévalo, P., Bratley, K. H., Bullock, E. L., Gorelick, N., Yang, Z. y Kennedy, R. E. (2022). Demystifying LandTrendr and CCDC temporal segmentation. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 110, 102806. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102806>

Poorter, L., Bongers, F., Aide, T., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H., Broadbent, E. N., Chazdon, R. L., Craven, D., de Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A., de Jong, B. H., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., Espírito-Santo, M. M., ... Rozendaal, D. M. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211-214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>

Potapov, P. V., Turubanova, S., Hansen, M. C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L. y Justice, C. O. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.027>

Puhm, M., Deutscher, J., Hirschmugl, M., Wimmer, A., Schmitt, U. y Schardt, M. A. (2020). Near real-time method for forest change detection based on a structural time series model and the Kalman filter. *Remote Sensing*, 12(19), 3135. <https://doi.org/10.3390/rs12193135>

Q

Qiu, S., Lin, Y., Shang, R., Zhang, J., Ma, L. y Zhu, Z. (2019). Making Landsat Time Series Consistent: Evaluating and improving Landsat analysis ready data. *Remote Sensing*, 11(10), 51. <https://doi.org/10.3390/rs11010051>

R

Ramírez, C. y Morales, D. (2021). *Integrating Forests and landscape restoration into national forest monitoring systems*. FAO.

Read, L. y Lawrence, D. (2013). Recovery of biomass following shifting cultivation in dry tropical forests of the Yucatán. *Ecological Applications*, 13(1), 85-97.

Reid, J. L., Fagan, M. E., Lucas, J., Slaughter, J. y Zahawi, R. A. (2019). The ephemerality of secondary forests in southern Costa Rica. *Conservation Letters*, 12(2), e12607. <https://doi.org/10.1111/conl.12607>

Reid, J. L., Wilson, S. J., Bloomfield, G. S., Cattau, M. E., Fagan, M. E., Holl, K. D. y Zahawi, R. A. (2017). How long do restored ecosystems persist? *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 102(2), 258-265. <https://doi.org/10.3417/2017002>

Reytar, K., Buckingham, K., Stolle, F., Brandt, J., Zamora R., Landsberg, F., Singh, R., Streck, C., Saint-Laurent, C., Tucker, C. J., Henry, M., Walji, K., Finegold, Y., Aga, Y. y Rezende, M. (2020). Measuring progress in forest and landscape restoration. *Unasylva*, 2052(71), 62-70.

Ruiz-Ramos, J., Marino, A., Boardman, C. y Suarez, J. (2020). Continuous forest monitoring using cumulative sums of Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 12(18), 3061. <https://doi.org/10.3390/rs12183061>

S

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>

Schwartz, N. B., Aide T. M., Graesser, J., Grau H. R. y Uriarte, M. (2020). Reversals of reforestation across Latin America limit climate mitigation potential of tropical forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 85. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00085>

Schwartz, N. B., Uriarte, M., Defries, R., Gutierrez-Velez, V. H. y Pinedo, M. A. (2017). Land-use dynamics influence estimates of carbon sequestration potential in tropical second-growth forest. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa708b>

NIVEL NACIONAL

Society for Ecological Restoration International Science y Policy Working Group (SER). (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. SER. https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.pdf

Stanturf, J. A., Kleine, M., Mansourian, S., Parrotta, J., Madsen, P., Kant, P., Burns, J. y Bolte, A. (2019). Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach. *Annals of Forest Science*, 76, 50. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>

Stehman, S. (2009). Sampling design for accuracy assessment of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 5243-5272. <https://doi.org/10.1080/01431160903131000>

Stehman, S. (2013). Estimating area from an accuracy assessment error matrix. *Remote Sensing of Environment*, 132, 202-211. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.016>

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>

Stehman, S. y Wickham, J. D. (2011). Pixels, blocks of pixels, and polygons: Choosing a spatial unit for thematic accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3044-3055. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.007>

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 No. 25. Unión Europea.

T

Tollerud, H. J., Zhu, Z., Smith, K., Wellington, D. F., Hussain, R. A. y Viola, D. (2023). Toward consistent change detection across irregular remote sensing time series observations. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113372>

U

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). (2020). *Restore Our Future. Bonn Challenge. Impact and potential of forest landscape*. <https://www.bonnchallenge.org/sites/default/files/resources/files/%5B-node%3Aand%5D/Bonn%20Challenge%20Report.pdf>

V

Verbesselt, J., Zeileis, A. y Herold, M. (2012). Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>

Vogelmann, J. E., Xian, G., Homer, C. y Tolck, B. (2012). Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses: Case studies in selected forest and rangeland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 122, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.027>

W

Williams, J., Jackson, T. D., Schönlieb, C. B., Swinfield, T., Irawan, B., Achmad, E., Zudhi, M., Habibi, G. E. y, Coomes, D. A. (2022). Monitoring early-successional trees for tropical forest restoration using low-cost UAV-based species classification. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.876448>

Y

Ye, L., Meiling, L., Xiangnan, L. y Z. Lihong. (2021). Developing a new disturbance index for tracking gradual change of forest ecosystems in the hilly red soil region of southern China using dense Landsat time series. *Ecological Informatics*, 61, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101221>

Yepes Quintero, A. P., Ruíz, A., Uribe Úsuga, M., Zuñiga, J., Vivescas, L. S., Zapata, M., González, C., Castro, A., Mera, F., Mocaleano, P., Pacheco, E. y Cabeza, O. (2019). *Asistencia técnica para la implementación del modelo de forestería comunitaria - Colombia*. Minambiente, FAO y Unión Europea.

Z

Zhang, S., Yu, J., Xu, H., Qi, S., Luo, J., Huang, S., Liao, K. y Huang, M. (2023). Mapping the Age of Subtropical Secondary Forest Using Dense Landsat Time Series Data: An Ensemble Model. *Remote Sensing*, 15(8), 2067. <https://doi.org/10.3390/rs15082067>

Zhang, Y., Wang, L., Zhou, Q., Tang, F., Zhang, B., Huang, N. y Nath, B. (2022). Continuous change detection and classification—Spectral trajectory breakpoint recognition for forest monitoring. *Land*, 11(4), 504. <https://doi.org/10.3390/land11040504>

Zhu, Z. (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>

Zhu, Z. y Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152-171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>

Zhu, Z., Wang, S. y Woodcock, C. E. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 159, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014>

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 6

Definiciones recopiladas para de las estrategias incluidas en el aplicativo de restauración (Minambiente) y el SNIF (Ideam)

Enfoque	Estrategia	Definiciones
Recuperación	Revegetalización	Restablecimiento de la cobertura vegetal en la que se emplean diversos biotipos, desde herbáceos y arbustivos hasta trepadores y árboles (Minambiente)²². Proceso por el cual se siembran o colonizan plantas en un área en la que la cobertura vegetal original ha sido removida. No implica (necesariamente) que se recupera la vegetación original, únicamente que algún tipo de vegetación ocupa el sitio (DNP y Minambiente, 2022). Proceso que normalmente es un componente de la recuperación, podría significar el establecimiento de solo una o unas pocas especies vegetales (Minambiente, 2012), con especies nativas o no (Gann <i>et al.</i>, 2019).
	Remediación	Gestión activa encaminada a remover fuentes de degradación, tales como la eliminación de contaminantes o el exceso de nutrientes del suelo y agua (Gann <i>et al.</i>, 2019).
Rehabilitación	Cerca viva	Consiste en árboles o arbustos plantados ubicados en los linderos externos o internos de predios, como método de delimitación de estos. Si forman parte de una plantación forestal industrial, un sistema agroforestal o silvopastoril o cultivos forestales con fines comerciales, su aprovechamiento y registro se efectuarán cumpliendo lo establecido (Decreto 1532 de 2019).

22. Véase <https://bibliovirtual.Minambiente.gov.co/documentos/tesauro/R/REVEGETALIZACI%D3N.htm>

NIVEL NACIONAL

Enfoque	Estrategia	Definiciones
Rehabilitación	Plantaciones forestales protectoras-productoras	Las que se establezcan en área forestal protectora en que el aprovechamiento directo o indirecto de la plantación está condicionado al mantenimiento de su efecto de protección del recurso. Además, se consideran plantaciones forestales protectoras-productoras las que se establecieron en áreas forestales protectoras productoras, clasificadas como tales antes de la vigencia de la Ley 1450 de 2011, las establecidas en cumplimiento del artículo 231 del Decreto Ley 2811 de 1974 y las que se establecen sin el Certificado de Incentivo Forestal (CIF) de reforestación. El registro, aprovechamiento, y demás actuaciones relacionadas con las plantaciones forestales protectoras-productoras en cualquiera de sus modalidades será competencia de las autoridades ambientales regionales (Decreto 1532 de 2019).
	Plantaciones forestales protectoras	Son las que se establecen en áreas forestales protectoras para proteger o recuperar algún recurso natural renovable. En ellas se puede adelantar el aprovechamiento de productos forestales no maderables y desarrollar actividades de manejo silvicultural, asegurando la persistencia del recurso. El registro, aprovechamiento, y demás actuaciones relacionadas con las plantaciones forestales protectoras en cualquiera de sus modalidades será competencia de las autoridades ambientales regionales (Decreto 1532 de 2019).
	Corredor biológico	Áreas de bosque nativo de longitud y ancho variable, construidas mediante faenas de restauración ecológica basada en sucesión secundaria. En estos se busca imitar la estructura y composición de la vegetación de los bosques nativos de acuerdo con un ecosistema de referencia. Se consideran dentro de esta categoría las actividades para ampliar el área de fragmentos de bosque nativo ya existentes (Minambiente, 2012).
	Otras herramientas del paisaje	Estos se introducirán al paisaje para lograr los cambios deseados en materia de aumento de la cobertura de bosques, conectividad y conservación del recurso hídrico y la biodiversidad. Se pueden identificar diferentes tipos: corredores biológicos, aislamientos de fragmentos, cercas vivas, agroforestales, reforestación protectora y enriquecimientos (Minambiente, 2012). En el caso de los aplicativos de reporte, es necesario aclarar cuales son las actividades que se incluyen bajo esta figura y que no se encuentren ya establecidas como una estrategia por sí misma.

NIVEL NACIONAL

Enfoque	Estrategia	Definiciones
Rehabilitación	Sistemas agroforestales y silvopastoriles	Combinación en tiempo y espacio de especies arbóreas con cultivos agrícolas o ganadería, con el fin de integrar armónicamente la actividad agropecuaria con la forestal para garantizar la sostenibilidad del sistema productivo (Minambiente, 2012).
	Manejo forestal sostenible	Proceso de planificación y ejecución de prácticas para la administración y uso de los bosques y otros terrenos arbolados, con el fin de cumplir objetivos ambientales, económicos, sociales y culturales específicos. Dicho proceso tiene que ver con todos los aspectos administrativos, económicos, legales, sociales, técnicos y científicos relacionados con los bosques naturales y plantados También se puede relacionar con diferentes grados de intervención planificada, desde acciones que buscan salvar y mantener los ecosistemas forestales y sus funciones ecológicas, hasta aquellas que buscan favorecer especies de valor social o económico, o grupos de especies que permitan mejorar la producción de bienes y servicios del bosque (Yepes Quintero <i>et al.</i> , 2019).
Restauración ecológica	Restauración pasiva (natural o espontánea)	Estrategia de restauración en la que los agentes causantes de la degradación se remueven y se deja el área sin otro tipo de actividad directa, en ocasiones el encerramiento de las áreas es suficiente (Minambiente, 2015; Atkinson y Bonser, 2020).
	Restauración activa (asistida)	Además de eliminar los agentes causantes de la degradación se incluyen intervenciones directas de manejo de las condiciones abióticas (p. ej.: recuperación de causas, traslado de suelo) y bióticas, tales como la remoción de especies invasoras o foráneas, el traslado de material vegetal y la reintroducción o enriquecimiento de las especies vegetales nativas (Minambiente, 2015).

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 2

Tabla 7

Atributos y dominios incluidos en la base de datos espacial recopilada para el monitoreo de la restauración del bosque

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Código Proyecto	Numérico	Código del proyecto asignado en el aplicativo del Proyectos de Restauración de Minambiente - SIAC.	N/A	
Fecha_creacion_reporte	Fecha	Fecha en la que se realiza el registro.	N/A	
Area_Calculada_(ha)	Numérico	Área en hectáreas del polígono de restauración .	N/A	
Nombre_proyecto_o_iniciativa	Texto	Nombre del proyecto de restauración.	N/A	X
Tipo_proyecto	Texto	Tipo de proyecto de acuerdo con los códigos establecidos para el aplicativo del Proyectos de Restauración de Minambiente - SIAC.	VOLU: voluntario OBAM: obligación ambiental MISI: misionales INVE: investigación OPDF: otros proyectos de fomento	
Entidad_Financiadora	Texto	Entidad que financia el proyecto.	N/A	
Entidad_Ejecutora	Texto	Entidad que implementa los proyectos de restauración.	N/A	X
Fecha_establecimiento	Fecha	Fecha de establecimiento de las actividades de restauración.	N/A	X
Plazo_ejecución_meses	Numérico sencillo	Duración del proyecto en meses.	N/A	X
Observaciones	Texto	Anotaciones sobre los registros.	N/A	
Codigo_presupuestal_BPIN_o_SE-COP	Numérico sencillo	Código presupuestal asignado el proyecto.	N/A	

NIVEL NACIONAL

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Validado	Texto	Se indica si el registro fue revisado y validado por Minambiente.	Si No	
Primer_Nombre	Texto	Primer nombre de quien hace el registro.	N/A	
Segundo_Nombre	Texto	Segundo nombre de quien hace el registro.	N/A	
Primer_Apellido	Texto	Primer apellido de quien hace el registro.	N/A	
Segundo_Apellido	Texto	Segundo apellido de quien hace el registro.	N/A	
Fuente_Financiacion	Texto	Origen de los recursos.	N/A	
Nit	Texto	Nit de quien hace el registro.	N/A	
Email	Texto	Dirección de correo electrónico de quien hace el registro.	N/A	
Telefono	Texto	Número de teléfono de quien hace el registro.	N/A	
Nombre_del_Usuario	Texto	Nombre del usuario asignado en la aplicación.	N/A	
Codigo_Tipo_Tramite	Texto		Levantamiento de veda Licenciamiento ambiental Sancionatorio Sustracción de área de reserva forestal Otro No aplica	

NIVEL NACIONAL

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Numero_de_Jornales	Texto	Número de jornales establecidos para implementar las actividades de restauración.	N/A	
Familias_Beneficiadas	Texto	Número de familias beneficiadas en la implementación de las actividades de restauración.	N/A	
Fortalecimiento_a_Viveros	Texto	Se indica si el proyecto incluye actividades de fortalecimiento a viveros.	Si No	
Plan_de_Monitoreo	Texto	Se indica si el proyecto incluye un plan de monitoreo de los avances de la restauración.	Si No	
Valor_Total_Proyecto_Mills	Numérico doble	Costo total del proyecto.	N/A	
ID_EnfoqueEstrategia	Numérico sencillo	Código de la estrategia en las tablas del aplicativo del Proyectos de Restauración de Minambiente y el SNIF.	1 a 13	
Enfoque	Texto	Enfoque de la implementación del proyecto de acuerdo con el PNR (Minambiente, 2015).	Recuperación Rehabilitación Restauración	X
Estrategia	Texto		Remediación Fitorremediación Obras biomecánicas Revegetalización Barreras rompevientos Plantaciones forestales productoras Sistemas agroforestales (silvo-pastoril y agrosilvopastoril) Manejo forestal sostenible Corredor biológico Otras herramientas del paisaje Reforestación** Pasiva natural o espontánea (aislamientos) Activa o asistida (enriquecimientos, manejo de regeneración natural)	X

NIVEL NACIONAL

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Area_Hectáreas	Numérico doble	Área dedicada a la implementación de la estrategia reportada por la entidad.	N/A	
Disturbio	Texto	Actividad que ocasionó el disturbio del ecosistema.	Actividades agrícolas Actividades pecuarias Cultivos ilícitos Deforestación Erosión Especies invasoras exóticas Incendio Infraestructura Inundaciones Minería Otras	
Cobertura inicial*	Texto	Cobertura de la tierra presente en el momento de la implementación de la restauración.	Zonas urbanizadas o industriales Zonas de extracción minera y escombreras Zonas verdes artificializadas no agrícolas Cultivos transitorios Cultivos permanentes Pastos Áreas agrícolas heterogéneas Bosques fragmentados o degradados Vegetación secundaria o en transición Plantaciones forestales Herbazal (natural) Arbustal (natural) Áreas abiertas o con poca vegetación Áreas húmedas continentales Áreas húmedas costeras	X
Ecosistema objetivo*	Texto	Cobertura de la tierra o ecosistema objetivo que se pretende restaurar.	Por definir	X

NIVEL NACIONAL

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Tipo de especies	Texto	Origen del material vegetal utilizado.	Nativas Introducidas o exóticas Mixtas	X
Numero_especies	Numérico sencillo		N/A	
NombreCientifico	Texto	Listado concatenado de las especies vegetales usadas en la restauración.	El listado de especies identificadas por Minambiente en el Aplicativo de proyectos de restauración se incluye en la base de datos geográfica.	X
NombreComun	Texto	Listado concatenado de los nombres comunes de las especies vegetales usadas en la recuperación, rehabilitación o restauración.	N/A	
NombreComun2	Texto	Listado concatenado de los nombres comunes de las especies vegetales usadas en la recuperación, rehabilitación o restauración.	N/A	
CantidadEspecimenes	Texto	Listado concatenado del número de individuos sembrados por cada especie vegetal usadas en la recuperación, rehabilitación o restauración.	N/A	
Años*	Texto	Año de establecimiento de las actividades de restauración.	N/A	X
Acuerdo_Resolucion*	Texto	Acto administrativo del proyecto.	N/A	
Estado del proceso*	Texto	Estado del proceso de restauración al momento del reporte.	Área preliminar Planeación/ Por ejecutar En ejecución Monitoreo Finalizado	X

NIVEL NACIONAL

Atributo o campo de la base de datos	Tipo	Descripción	Valores (dominios)	Atributo mínimo
Vereda*	Texto	Vereda en la que se ubica el proyecto.	N/A	
Municipio*	Texto	Municipio en el que se ubica el proyecto.	N/A	
Departamento*	Texto	Departamento en el que se ubica el proyecto.	N/A	
Entidad*	Texto	Entidad que genera o reporta el dato.	N/A	
Fuente_informacion*	Texto	Fuente de la que se obtuvo el dato.	N/A	
Inconsistencias*	Texto	Inconsistencias geográficas, temáticas o alfanuméricas detectadas.	N/A	
Estrategia_original	Texto	Nombre de la estrategia tal cual aparece en la fuente original.	N/A	

* Campos añadidos a la base de datos que no se encontraban en el aplicativo de proyectos de restauración de Minambiente y el SNIF. Se crearon los dominios correspondientes en la base de datos geográfica cuando incluyen valores predeterminados.

** Añadido para incluir este tipo de actividad, común en la información del aplicativo ANLA, y que no es posible determinar si corresponde a restauración activa/asistida o a una plantación forestal protectora.

Nota: los atributos provienen de las bases de datos de Minambiente y el SNIF, y se incluyen otros atributos que facilitan el monitoreo (indicados con *). Además, se señalan con X los atributos mínimos recomendables para el análisis de la información.

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 3

ESTRUCTURA PROPUESTA PARA LOS REPORTES DE LA RESTAURACIÓN DE BOSQUES

CONTEXTO

Contexto normativo, de políticas, institucional, estrategias y metas en las que se enmarca el reporte.

ALCANCE Y CONSIDERACIONES DEL REPORTE

Alcance, consideraciones, aclaraciones y limitaciones del reporte, necesarias para interpretar los datos.

CONCEPTOS UTILIZADOS PARA EL REPORTE DE LA RESTAURACIÓN

Conceptos básicos que permitan entender los indicadores reportados.

RESULTADOS DEL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE 20XX – 20XX

RESULTADOS A NIVEL NACIONAL

SUPERFICIE TOTAL REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE RECOPIADAS PARA EL ANÁLISIS

XXX.XXX ha

Distribuidas en:
XXXX áreas (polígonos) aprox.

SUPERFICIE CON EVIDENCIA DE GANANCIA DE COBERTURA DE BOSQUE O VEGETACIÓN LEÑOSA DENTRO DE LAS ÁREAS RECOPIADAS

XXXXXX XXX ha

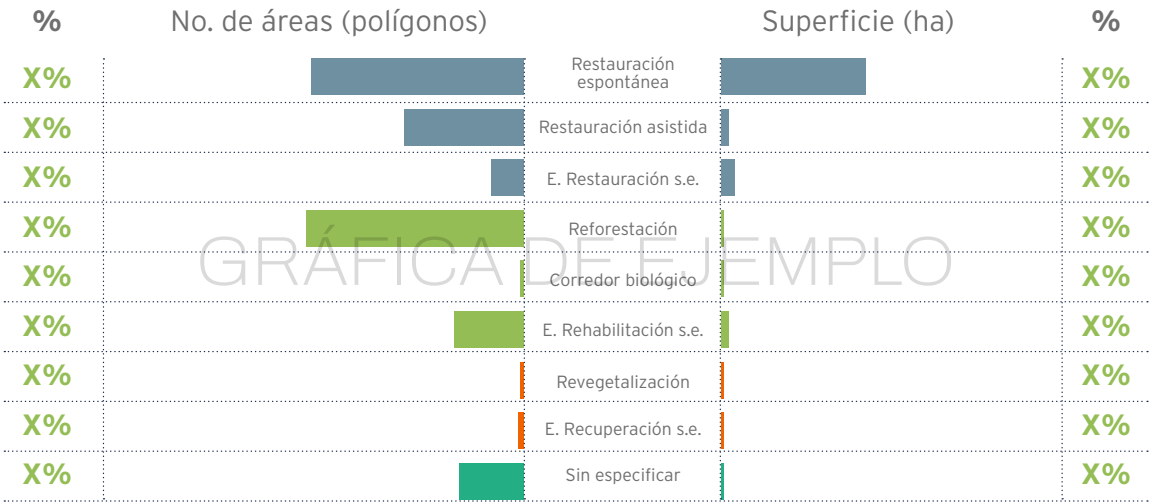
Intervalo de confianza del XX %*

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

NIVEL NACIONAL

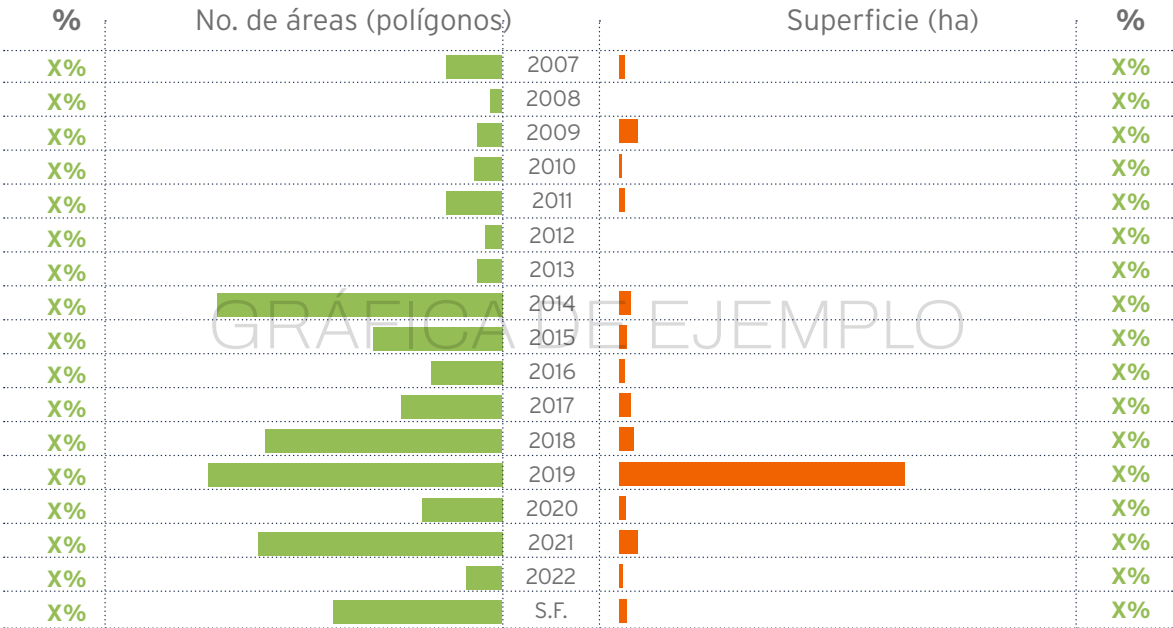
NÚMERO DE ÁREAS Y SUPERFICIE REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE POR ESTRATEGIA

SUPERFICIE (HA) Y NÚMERO DE ÁREAS CON INICIATIVAS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE REPORTADAS ENTRE 20XX Y 20XX Y RECOPILADAS PARA EL ANÁLISIS



NÚMERO DE ÁREAS Y SUPERFICIE REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE POR AÑO DE IMPLEMENTACIÓN REGISTRADO

SUPERFICIE (HA) Y NÚMERO DE ÁREAS CON INICIATIVAS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE REPORTADAS ENTRE 20XX Y 20XX²³ Y RECOPILADAS PARA EL ANÁLISIS



23. Corresponde a la fecha incluida en las bases de datos, sin embargo, esta no siempre coincide con la fecha de implementación o inicio de las actividades de restauración.

NIVEL NACIONAL

SUPERFICIE REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE VS. SUPERFICIE CON GANANCIA DE COBERTURA DE BOSQUE O VEGETACIÓN LEÑOSA OCURRIDA ENTRE 20XX Y 20XX POR PERIODO DE ANÁLISIS

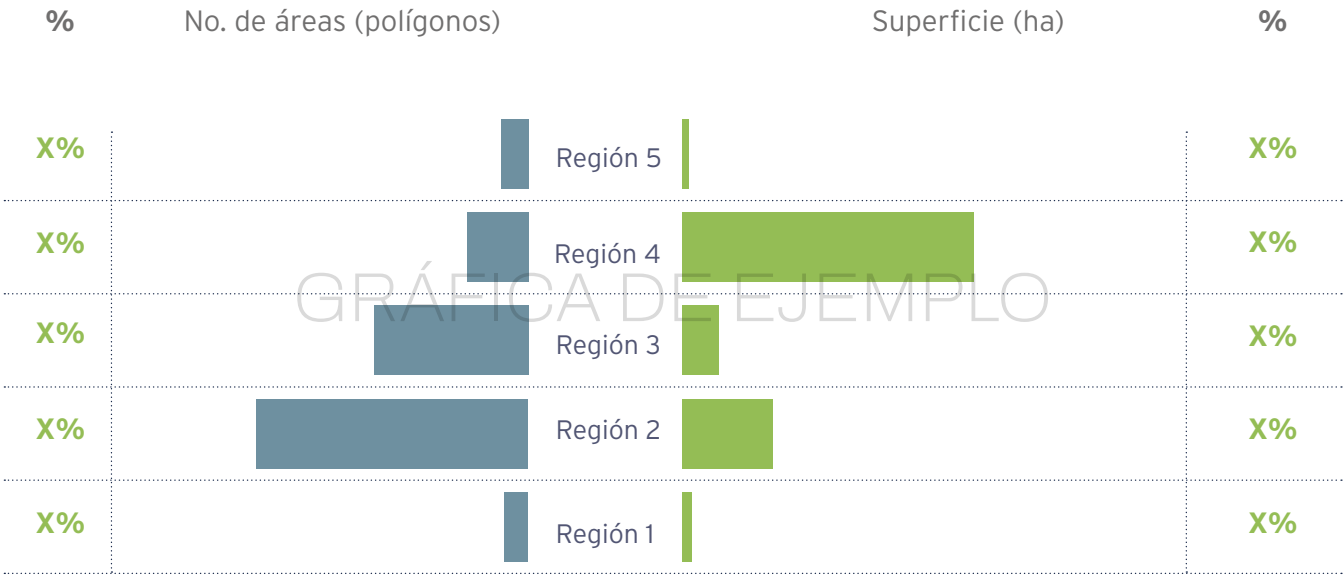
SUPERFICIE TOTAL (HA) REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE RECOPIADAS POR PERIODO

SUPERFICIE (HA) ACUMULADA CON GANANCIA DE COBERTURA DE BOSQUE O VEGETACIÓN LEÑOSA POR PERIODO



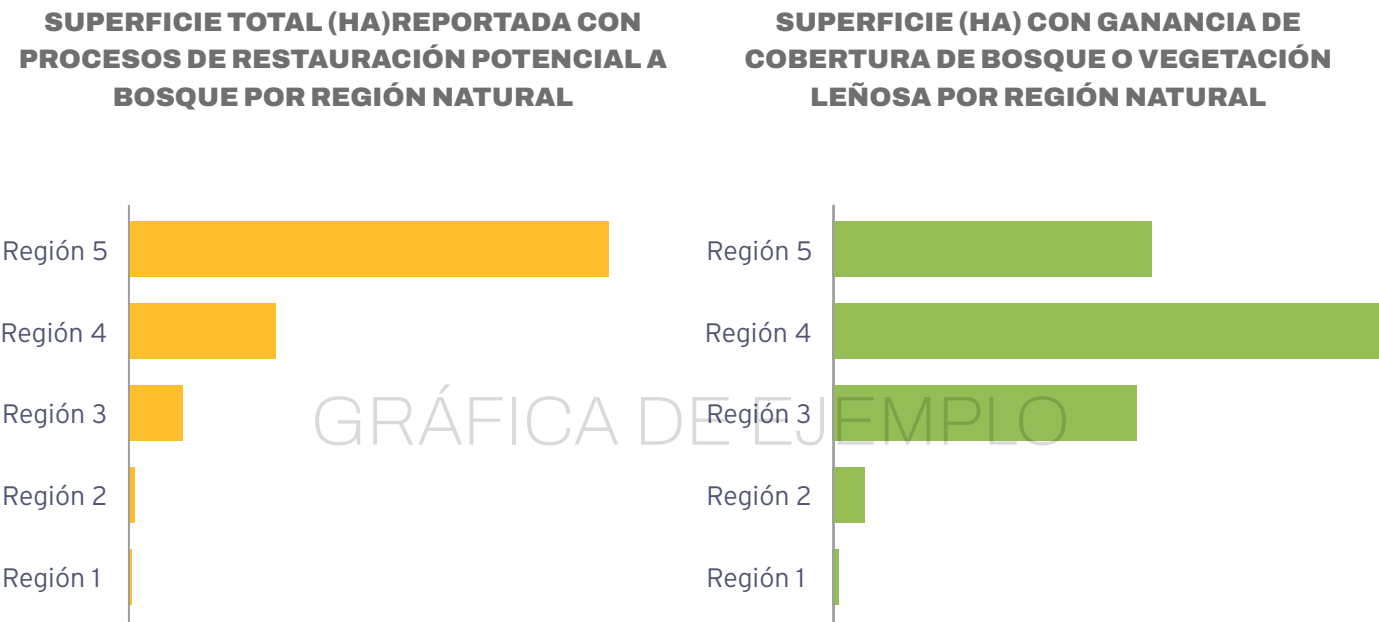
ÁREAS REPORTADAS CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE Y RECOPIADAS PARA EL ANÁLISIS POR REGIONES NATURALES

SUPERFICIE (HA) Y NÚMERO DE ÁREAS CON INICIATIVAS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE REPORTADAS ENTRE 20XX Y 20XX Y RECOPIADAS PARA EL ANÁLISIS EN CADA REGIÓN NATURAL



NIVEL NACIONAL

SUPERFICIE REPORTADA CON PROCESOS DE RESTAURACIÓN POTENCIAL A BOSQUE VS. SUPERFICIE CON GANANCIA DE COBERTURA DE BOSQUE O VEGETACIÓN LEÑOSA OCURRIDA ENTRE 20XX Y 20XX POR REGIÓN NATURAL



SÍNTESIS METODOLÓGICA DEL REPORTE DE MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DEL BOSQUE CON SENSORES REMOTOS

PERIODO 20XX-20XX

OBJETIVO / PERTINENCIA

Objetivo del reporte.

PERIODO DE REFERENCIA/ COBERTURA TEMPORAL

Periodo de la información presentada.

DISEÑO Y METODOLOGÍA

Resumen de los datos y metodología utilizada para generar el reporte. Incluye:

- 1. Fuente de datos e insumos.
- 2. Universo de estudio.
- 3. Metodología para generar el reporte.
 - 3.1 Recopilación y estructuración de la base de datos de las áreas reportadas con procesos de restauración.
 - 3.2 Elaboración del mapa de restauración del bosque a partir de datos de sensores remotos.
 - 3.3 Muestreo para la evaluación de exactitud temática y estimación de áreas.
- 4. Indicadores o estadísticas del reporte
 - Descripción de los indicadores reportados y sus fórmulas de cálculo.



IDEAM
Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales



Con el apoyo de:



Embajada de Noruega