



---

**Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021**

---

## **Investigación de base**

---

Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica durante el período 1986-2019

**Investigadores:**

Esteban Durán Monge

Amram Aragón Ramírez

San José | 2021



333.75  
D948p

Durán Monge, Esteban.

Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica durante el período 1986-2019 / Esteban Durán Monge, Amram Aragón Ramírez. -- San José. -- Datos electrónicos (1 archivo : 3.800 kb). -- San José, C.R. : CONARE - PEN, 2021.

ISBN 978-9930-607-76-3

Formato PDF, 59 páginas.

Investigación de Base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021 (no. 27)

1. EMISIONES DE GASES. 2. COBETURA FORESTAL. 3. COSTA RICA. I. Aragón Ramírez, Amram. II. Título.



## **Índice**

Presentación	4
Hallazgos relevantes	4
Introducción	7
Antecedentes	8
Abordaje metodológico	10
Fuentes de información	10
Métodos	12
Actualización de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica y la herramienta FREL & MRV TOOL	14
Análisis espacial y temporal de depósitos de carbono	17
Análisis espacial y temporal de las emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal	18
Escenario de depósitos de carbono ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas	19
Limitaciones metodológicas y de las fuentes de información	21
Incertidumbre	23
Resultados	25
Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono	25
Emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal	36
Escenario de depósitos de carbono ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas	47
Conclusiones y trabajo futuro	51
Conclusiones	51
Trabajo futuro	54
Bibliografía	56

## **Presentación**

Esta Investigación se realizó para el Informe Estado de la Nación 2021. El contenido de la ponencia es responsabilidad exclusiva de su autor, y las cifras pueden no coincidir con las consignadas en el Informe Estado de la Nación 2021 en el capítulo respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.

El presente documento es un avance de la ponencia: “Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica durante el período 1986-2019” realizada por Esteban Durán Monge y Amram Aragón. Esta investigación servirá de insumo en la elaboración del capítulo Armonía con la Naturaleza del Informe Estado de la Nación 2021. A continuación, se detallan las preguntas de investigación del estudio:

- ¿Cómo ha sido el comportamiento en el tiempo y distribución espacial de los depósitos forestales de carbono, las emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal?
- ¿Cuáles zonas del país tienen mayor potencial forestal para la mitigación del cambio climático?
- ¿Cuál ha sido el impacto de las actividades humanas en la reducción de los depósitos forestales de carbono, las emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal?
- ¿Cuáles son las principales implicaciones de estos patrones en las estrategias de mitigación del cambio climático en el ámbito forestal?

## **Hallazgos relevantes**

- Entre los años 1986 y 2019 se estima que a nivel nacional los depósitos forestales de carbono (la cantidad de carbono secuestrada de la atmósfera y almacenada dentro de los ecosistemas forestales) alcanzaron un valor promedio de 1.055 millones de tCO<sub>2</sub>-e.
- La disminución más marcada de los depósitos forestales de carbono se registra entre los años 1986 y 1992 con un decrecimiento de -4,8%, lo que significó una reducción de 1.095,6 millones de tCO<sub>2</sub>-e a 1.043,5 millones de tCO<sub>2</sub>-e entre esos dos años. Luego de alcanzar su nivel más bajo de 1.027,4 millones de tCO<sub>2</sub>-e en el año 2001, se observa una recuperación que se acelera en los últimos seis años analizados, hasta alcanzar un valor de 1.080,3 millones de tCO<sub>2</sub>-e en el 2019.
- El patrón temporal identificado, que inicia con una tendencia a la baja, seguida de un periodo de estabilidad y una posterior recuperación en los últimos años, muestra que aún no se alcanzan los niveles de depósitos forestales de carbono de finales de la década de los ochenta.

- Las áreas de conservación La Amistad Caribe (ACLAC) y Central (ACC) acumulan la mayor parte de los depósitos forestales de carbono y el potencial de mitigación del cambio climático en el ámbito forestal, con valores promedio entre los años 1986 y 2019 de 20,7% y 17,9% respectivamente.
- Las áreas Huetar Norte (ACAHN), La Amistad Pacífico (ACLAP), Tempisque (ACT) y Osa (ACOSA) muestran valores intermedios de depósitos forestales de carbono que oscilan entre el 13,2% y 8,8% del total nacional a lo largo del período de estudio.
- Aunque los depósitos forestales de carbono presentan un patrón de relativa estabilidad a través del tiempo, sus aumentos y disminuciones no se han distribuido de manera homogénea en el territorio nacional, pues tuvo lugar un efecto de compensación, donde las pérdidas localizadas en regiones específicas fueron contrarrestadas por aumentos de depósitos en otras zonas.
- Las áreas de conservación Central, La Amistad Caribe, Huetar Norte y Tortuguero, muestran un balance negativo en sus depósitos forestales de carbono, que se traduce en una pérdida estimada conjunta de 68,7 millones de tCO<sub>2</sub>-e entre los años 1986 y 2019. Las reducciones más drásticas de los depósitos forestales de carbono ocurrieron en las áreas de conservación Huetar Norte (reducción del 16,9% con respecto al año 1986) y Tortuguero (reducción del 30,3% con respecto al año 1986).
- Las áreas de conservación Osa, Tempisque y Pacífico Central presentan un aumento en sus depósitos forestales de carbono. Como resultado, estas áreas mostraron, para el año 2019, un incremento en sus depósitos que equivale en promedio al 20,2% con respecto al año 1986.
- Existe una importante concentración de depósitos forestales de carbono dentro de áreas protegidas. Aunque estas representan solo el 25,5% del territorio continental nacional, entre los años 1986 y 2019 aportaron en promedio el 40,7% de los depósitos de carbono del país. Estas muestran el comportamiento más estable a lo largo del período analizado.
- Los bosques fuera de áreas protegidas aportan la mayor parte de los depósitos forestales de carbono. Estos mostraron una tendencia comparativamente menos estable.
- La recuperación de los depósitos forestales de carbono registrada hacia el cierre del período comprendido entre los años 1986 y 2019 tuvo lugar fuera de áreas protegidas.
- El análisis muestra una reducción importante de las emisiones por deforestación (pérdida de cobertura forestal, es decir, hectáreas de bosque que dejaron de ser bosque debido a perturbaciones inducidas por actividades humanas o procesos naturales) que pasaron de 13,0 millones de tCO<sub>2</sub>-e en 1986, el valor más alto registrado durante el período estudiado, a 1,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e en 2019, momento en que se alcanza el nivel mínimo de emisiones.

- Las remociones por cambios en cobertura forestal muestran un comportamiento estable a lo largo de la serie, con un promedio estimado de 6,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e durante el periodo comprendido entre los años 1986 y 2019.
- En el ámbito forestal el país ha tenido un balance positivo como sumidero de carbono (reservorio que acumula y almacena el carbono secuestrado) desde el año 2002 hasta el 2019. Este resultado se ha sustentado principalmente por la reducción de las emisiones por deforestación y el mantenimiento de un nivel estable de remociones, es decir, no se han logrado aumentos significativos en los niveles de absorción durante el período 1986-2019.
- El área de conservación Huetar Norte concentró la mayor parte de las emisiones, con un aporte del 26,6% con respecto a las otras áreas. En segundo lugar, se ubica el área Central (15,7%), seguida por Tortuguero (10,0%) y La Amistad Pacífico (10,9%).
- El aporte de la reforestación en las remociones ha sido históricamente bajo y ha perdido peso con el paso del tiempo. El flujo de remociones pasó de estar compuesto por una combinación de reforestación (20,9%) y bosque que se mantiene como bosque (79,1%), a estar basado principalmente en el crecimiento de existencias de carbono en bosques secundarios que se mantienen como tales y fueron recuperadas en los últimos años, que para los últimos dos años aportó el 99,6% de las remociones.
- La sustitución de bosques por pastos es la principal responsable de las emisiones por deforestación durante el periodo comprendido entre los años 1986 y 2019 con un total de 146,9 millones de tCO<sub>2</sub>-e y un aporte del 70,9%. En segundo lugar, con un peso significativamente menor, está la sustitución de bosques por cultivos con un total de 39,5 millones de tCO<sub>2</sub>-e que equivalen al 19,1% de las emisiones totales.
- Las emisiones generadas durante el periodo 1986-2019 derivadas de la pérdida de bosques por sustitución hacia pastos, se concentraron mayoritariamente en el área Huetar Norte (29,5%). Las áreas de Tortuguero, La Amistad Pacífico, Central y Tempisque presentan una afectación relativamente menor pero también considerable, con valores de concentración de emisiones que van desde 12,2% a 10,3%.
- En el caso de las emisiones por deforestación asociadas con cultivos, el mayor aporte tuvo lugar en la región Central (29,0%), seguida muy de cerca por la Huetar Norte (26,1%).
- Un análisis exploratorio de los depósitos de carbono, que considera las diferencias en la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques dentro de áreas protegidas, muestra que el nivel general de los depósitos podría ser menor que el estimado mediante los datos oficiales. Además, los resultados muestran que se acentúa el patrón de concentración espacial, tanto desde el punto de vista de áreas de conservación, como desde la perspectiva de concentración de los valores altos de depósitos exclusivamente dentro de zonas protegidas.

## **Introducción**

En las últimas décadas, el cambio climático ha tenido impactos importantes sobre los sistemas humanos y naturales (IPCC, 2014). Sus consecuencias trascienden el ámbito ambiental y se extienden hasta lo social y económico, de manera que se ha convertido en uno de los principales retos para el desarrollo humano (PNUD, 2009). Las actividades humanas están impulsando estos cambios en el clima mediante la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) destaca como el principal gas en las emisiones globales (EPA, 2021).

Los bosques son un componente clave en el ciclo global de carbono (Fonseca et al., 2020), por tanto, tienen un efecto directo sobre la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> y son cruciales para el clima mundial (FAO, 2013). Los ecosistemas forestales son multifuncionales (Morison et al., 2012). Por un lado, constituyen depósitos y sumideros, que almacenan y remueven CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Al mismo tiempo, debido a la deforestación y degradación forestal, pueden constituir una fuente de emisiones de GEI al liberar los gases que almacenan. Esta capacidad de los bosques para contrarrestar la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera causada por perturbaciones antropogénicas, que se deriva de su papel como depósitos y sumideros de carbono, los posiciona como un factor determinante para la mitigación del cambio climático (Loustau, 2010).

Por este motivo, comprender la dinámica de los depósitos forestales de carbono del país y el comportamiento de las remociones y emisiones de GEI asociadas con cambios en el uso del suelo, es clave para generar información que permita propiciar una discusión pública más informada, y asistir al sector forestal en el diseño de estrategias de gestión de los recursos forestales, para maximizar su potencial de mitigación. Esto cobra aún más relevancia de cara a los compromisos internacionales que tiene el país en esta materia, como el Acuerdo de París y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, así como en el contexto de iniciativas de política pública recientes, como el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050 (Minae, 2019a). Este último destaca el papel de los bosques como proveedores de servicios ecosistémicos y sumideros de carbono, que son indispensables para potenciar la descarbonización de la economía costarricense. Es importante considerar que, si bien es cierto, este estudio se enfoca en el sector forestal, las emisiones y remociones de GEI del país también son afectadas significativamente por otros sectores como el energético, industrial, agrícola y manejo de residuos, entre otros. Así, es de gran relevancia el desarrollo de investigaciones y estrategias de política que puedan atender las diversas fuentes de estas emisiones.

El presente trabajo aporta evidencia basada en la serie histórica de mapas de cobertura terrestre de la Estrategia Nacional REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques), mediante un análisis exploratorio que tiene por objetivo principal estudiar los patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, así como las remociones y emisiones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica entre los años 1986-2019. Esto para entender el efecto de dichos patrones en el potencial forestal del país para la mitigación del cambio climático.

El documento se organiza de la siguiente manera. La segunda sección resume los antecedentes más relevantes para el desarrollo del estudio. Posteriormente, se describen la metodología y fuentes utilizadas. En el cuarto apartado se presenta una síntesis de los hallazgos más

relevantes. Finalmente, se exponen las principales conclusiones de la investigación y temas planteados para el trabajo futuro. Estos últimos se relacionan principalmente con análisis que escapan del alcance del presente trabajo, como lo son el efecto de las políticas públicas (implementadas a través de la historia) y otros factores socioeconómicos sobre los depósitos de carbono, entre otros temas.

## **Antecedentes**

En Costa Rica, diversos estudios han analizado la biomasa y depósitos de carbono en ecosistemas forestales y otros usos del suelo. Una sistematización de literatura sobre esta materia, realizada para la preparación del nivel de referencia REDD+ (MINAE, 2016), que fue actualizada para el desarrollo de la presente investigación, registra un total de 119 publicaciones realizadas entre los años 1979 y 2020.

El uso de modelos alométricos sobresale como la técnica más utilizada para estimar biomasa y carbono almacenado. Este tipo de ecuaciones, aplicadas para los bosques del país, posibilitan obtener estimaciones más precisas que propicien una reducción de la incertidumbre al evitar el uso de modelos desarrollados para ecosistemas forestales ubicados fuera de las fronteras del país (Fonseca et al. 2020). Algunos trabajos relevantes incluyen el de Cifuentes (2008) que realiza una medición de la biomasa aérea total y reservas de carbono en ecosistemas de bosques secundarios tropicales de seis zonas de vida del país. Estas ecuaciones alométricas son utilizadas para las estimaciones del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Costa Rica (IMN, 2019) y el nivel de referencia de Costa Rica.

Más recientemente Morera (2019) utiliza este tipo de ecuaciones para analizar el aporte al ciclo de carbono de los ecosistemas forestales en la Península de Osa. Otro trabajo reciente de Retana-Chinchilla et al. (2019) realiza estimaciones en el oeste de San José. Por su parte Fonseca et al. (2019) y Fonseca et al. (2020) realizan una cuantificación de biomasa y carbono almacenado en bosques naturales en cuatro ecosistemas forestales naturales de Costa Rica, a saber, Zona Norte, Bosque de Altura, Pacífico Central y bosques caducifolios en Guanacaste.

Según se detalla en la siguiente sección del trabajo, la integración de estos y otros resultados de más larga data, será parte de la base para la estimación de las densidades de carbono que serán utilizadas en la presente investigación. Si bien es cierto, las mediciones provienen de una amplia variedad de fuentes, se han realizado esfuerzos importantes por estimar las existencias de carbono en distintos tipos de ecosistemas forestales y zonas de vida a nivel nacional.

Por otro lado, además de estas publicaciones y estimaciones realizadas con un enfoque más académico y para zonas específicas del país, en Costa Rica existe el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNFM). Mediante la participación de múltiples entidades, este genera información desde una perspectiva nacional (REDD, 2019; REDD, 2020). Cuenta con el apoyo técnico del Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE) para el establecimiento de sus procesos y metodologías, que además es la plataforma oficial para integrar la información del sistema de medición, reporte y verificación de emisiones y remociones de GEI del sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.

El SNMF tiene cuatro funciones principales (REDD, 2019). La primera es el cálculo de datos de actividad mediante un sistema de monitoreo satelital de la tierra. Este recoge y analiza datos sobre usos del suelo y sus cambios. En este proceso participan el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) que ha generado los mapas de cobertura de uso de la tierra para los inventarios nacionales de GEI en Costa Rica (INGEI), y la Secretaría de REDD+ que ha desarrollado los mapas de cobertura de uso del suelo para las series históricas del nivel de referencia presentado ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Su segunda función es la estimación de factores de emisión a través del Inventario Nacional Forestal (INF) que es liderado por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC, 2015). Este realiza una cuantificación y caracterización de los recursos forestales del país y establece la línea base para la implementación del Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) en el marco de la Estrategia nacional REDD+. Dicho trabajo lleva a cabo estimaciones de biomasa y carbono para los diferentes estratos contemplados en el análisis a partir de funciones alométricas de biomasa, que fueron recopiladas mediante revisión de literatura y, para algunos reservorios, utilizan análisis de laboratorio. Este inventario es quizás uno de los antecedentes más relevantes en estimación de depósitos forestales de carbono a nivel nacional y reporta para el año 2015 un total de depósitos de carbono que asciende a 1.396,9 millones de tCO<sub>2</sub>-ei. Aunque su publicación más reciente fue en el año 2015, desde el 2020 se inició con un proceso de actualización que, a la fecha de realización de este trabajo, no ha sido publicado.

En tercer lugar, el SNMF se encarga de la estimación nacional de emisiones y absorciones a través del INGEI desarrollado por el IMN. Este abarca la contabilidad desde una perspectiva nacional de las emisiones del sector Agricultura, Forestal y otros usos del suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés). Finalmente, su cuarta función es la generación de informes y anexos técnicos con los resultados de los procesos anteriores, que son sujetos a verificación por revisores externos. Como parte fundamental de este sistema también destaca la Estrategia REDD+, encargada de elaborar el nivel de referencia de emisiones por deforestación y degradación forestal, así como el análisis de remociones por mejoras en los depósitos forestales de carbono, esto con un enfoque nacional.

Como resultado de estos esfuerzos, se han logrado una serie de avances a nivel país en materia de reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques. En primer lugar, la implementación de los pilares de Varsovia para acceder a pagos por resultados REDD+ (CMNUCC, 2021a) que incluyen (además del SNMF): el desarrollo de la Estrategia REDD+ de Costa Rica; el primer Informe sobre abordaje y respeto de las salvaguardas de Cancún en el marco de la estrategia REDD+; la presentación del Nivel de Referencia Forestal de Costa Rica ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC); y la inclusión del Anexo REDD+ en el Informe Bienal de Actualización o BUR por sus siglas en inglés (CMNUCC, 2021b). En segunda instancia, destacan otros avances como la aprobación y puesta en marcha del Proyecto Pago Basado en Resultados REDD+ por las reducciones de emisiones de Costa Rica de los años 2014 y 2015 (GCF, 2021). Se trata de una iniciativa financiada por el Fondo Verde del Clima, cuya implementación inicia en 2021 y se extenderá hasta el 2026. Además, la preparación del país y la firma del Acuerdo de Pagos por Reducciones de Emisiones

2018-2024 con el Fondo de Carbono de la Cooperativa de Carbono Forestal del Banco Mundial es un ejemplo más de los logros en esta materia (FCPF, 2021). Finalmente, destacan otras iniciativas como la participación de Costa Rica en el Mercado doméstico voluntario de carbono (PNUD, 2021) y la Coalición para la reducción de emisiones mediante la aceleración del financiamiento de los bosques denominada LEAF por sus siglas en inglés (LEAF, 2021).

La presente investigación parte de los esfuerzos mencionados anteriormente y utiliza insumos generados en varios de esos procesos, para realizar un análisis exploratorio que brinde evidencia desde una perspectiva territorial y temporal. Este trabajo fue posible gracias a la colaboración del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), la Estrategia Nacional REDD+ y el apoyo de expertos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

## **Abordaje metodológico**

### **Fuentes de información**

Este estudio se basa en cuatro fuentes de información. La primera de estas es la serie histórica de mapas de cobertura del suelo de REDD+ (Minae, 2019b). Esta es una serie temporal de mapas construida a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat, que constituye un proxy de los usos de suelo en el territorio nacional y comprende un total de 5.133.939,50 ha. Incluye seis categorías o usos del suelo: tierras forestales, cultivos, pastizales, áreas urbanas, humedales y otras tierras (suelos desnudos y páramos).

La serie está compuesta por mapas correspondientes a diez cohortes: 1986, 1992, 1998, 2001, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017 y 2019. Cada mapa está compuesto por píxeles de imágenes clasificadas que tienen dimensiones de 30x30 m, para así conformar un área mínima de mapeo de 0,99 ha (equivalente a 11 píxeles) cercana al umbral mínimo de 1 ha de la definición de bosque.

En el caso de las tierras forestales, dado que los bosques poseen contenidos distintos de carbono en función de su ubicación y edad, los mapas consideran una clasificación en cinco estratos de bosques: 1) muy húmedos y pluviales, 2) húmedos, 3) secos, 4) manglares y 5) bosques de palmaiv. Esta se basa en las zonas de vida según Holdridge (1966) y el Mapa de las Vertientes del Atlántico y Pacífico. Además, los mapas incluyen una segunda categorización según tipo de bosque que considera dos clases: bosques primarios y nuevos. Los bosques nuevos son áreas clasificadas como “bosques” que aparecen en áreas que anteriormente fueron clasificadas como “no bosque”, es decir, son bosques secundarios. Adicionalmente, en el caso de las plantaciones forestales, debido a la falta de datos confiables e inconsistencias con respecto a otras fuentes, estas se incluyen en la categoría de bosques nuevos.

Finalmente, estos mapas clasifican los bosques nuevos en cohortes de edad en función del período en que aparecen en los mapas. Para esto utilizaron una serie de supuestos. En primer lugar, se utilizan edades mínimas de 8 años (para bosques secos) y 4 años (para los otros estratos) a partir de las cuales estos bosques se vuelven detectables por las imágenes satelitales. Por otro lado, se asume que el área de un bosque nuevo para un período específico es igual en cada año incluido en ese mismo período. Por último, para obtener los bosques nuevos

anteriores la primera cohorte analizada (1986), se utiliza como referencia el mapa auxiliar MBS80 del IMN y se asume que los bosques secundarios identificados en dicho mapa estaban representados en proporciones iguales de área para todas las clases de edad.

En suma, el uso de esta fuente para analizar las diferentes coberturas y los cambios de uso confiere una serie de ventajas de gran relevancia desde el punto de vista analítico. En primer lugar, se trata de una serie histórica que garantiza la consistencia en el análisis. Por otro lado, la distancia entre cohortes es relativamente corta y permite trabajar con períodos que abarcan como máximo seis años. Finalmente, se trata de una fuente que incorpora los estándares de calidad propios del IPCC y que es sometida a diferentes validaciones por parte de organismos internacionales.

La segunda fuente es la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica realizada para la preparación del nivel de referencia REDD+ (Minae, 2019b). Esta fue desarrollada por Carbon Decisions International para compilar todos los datos existentes en el país sobre los niveles de carbono en los distintos reservorios y clases de uso de suelo. La versión publicada contiene una compilación de datos hasta el 2015, por este motivo, fue actualizada para el desarrollo de esta investigación con publicaciones realizadas hasta el 2020.

Esta base integra a) estimaciones del INF y b) estimaciones obtenidas a través de una revisión de literatura sobre datos de carbono o biomasa, generados mediante mediciones directas de campo en el país. Compila un total de 119 referencias sobre datos de carbono y biomasa, sin embargo, únicamente 38 fueron incluidas como entradas en la base pues contienen datos de densidades de carbono y además fueron publicadas más recientemente, a saber, del año 2005 en adelante. De esta forma, la base recopila 484 estimaciones (incluyendo las del INF) que fueron sometidas a un proceso de clasificación y homogeneización, para así asignarlas a los cinco estratos de bosques contemplados en el análisis.

Para efectos de este trabajo, y siguiendo la metodología del nivel de referencia del país, para las tierras forestales se utiliza la información recopilada para los siguientes reservorios: biomasa aérea arbórea (BARA), biomasa subterránea arbórea (BARS), madera muerta aérea (MMA) y hojarasca (H). Además, para otros usos no forestales se incluyen las estimaciones de biomasa aérea no arbórea (BNAA). Las incertidumbres reportadas en las estimaciones se incluyen y homogenizan en la forma de errores al 95% de nivel de confianza.

La tercera fuente es la herramienta del nivel de referencias de emisiones forestales, medición, reporte y verificación (NRE/MRV), también denominada FREL & MRV Tool por sus siglas en inglés (Minae, 2019b). Esta incluye los datos y cálculos para la construcción del nivel de referencia del país. Específicamente, en esta investigación se utiliza la sección de depósitos de carbono, que se alimenta con los parámetros generados mediante la base de datos de densidades de carbono.

Contiene los valores promedio de existencias de carbono por hectárea según reservorio en  $tCO_2 - e ha^{-1}$  (toneladas de dióxido de carbono equivalente por hectárea) para cada categoría de uso del suelo. Además, incluye la información sobre sus incertidumbres asociadas. En el caso de tierras forestales contiene el detalle por estrato, tipo de bosque y cohorte de edad.

Finalmente, como cuarta fuente de información se utilizan las densidades de carbono estimadas por REDD+ Costa Rica y el Catie (Obando et al., 2021) a partir del INF. Según se detalla en la siguiente sección, estos datos se utilizan para llevar a cabo un ejercicio exploratorio y complementario, que da cuenta sobre las diferencias en la biomasa de los bosques dentro de las áreas protegidas a nivel nacional.

## **Métodos**

Para analizar los patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, así como las remociones y emisiones por cambios en la cobertura forestal, se lleva a cabo un proceso de cuatro etapas:

1. Actualización de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica y la herramienta NRE/MRV
2. Análisis espacial y temporal de depósitos forestales de carbono
3. Análisis espacial y temporal de las emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal
4. Escenario de depósitos forestales ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas

Los diversos análisis realizados utilizan como unidad analítica las áreas de conservación del país<sup>vi</sup> que son el punto de referencia para la planificación y desarrollo de políticas de conservación y sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales del país. Estas se encuentran a cargo del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), entidad encargada de la gestión y coordinación en los ámbitos forestal, vida silvestre, áreas protegidas, recursos hídricos.

A continuación, se describen los principales aspectos metodológicos implicados en cada etapa del proceso de investigación. Además, el recuadro 1 presenta una serie de definiciones relevantes que deben ser tomadas en consideración al momento de interpretar los resultados que se presentarán más adelante.

---

### **Recuadro 1**

#### **Definiciones relevantes**

Bosque: cobertura forestal con una superficie mínima de tierras de 1 hectárea con una cubierta de copas que excedan el 30% y árboles de altura mínima de 5 metros de madurez in situ.

Bosque primario: cobertura forestal que ha existido de manera ininterrumpida a partir de los años 1985-1986 y que además no fue clasificado como bosque secundario en el mapa de coberturas de 1985-1986. Se trata de bosques naturales que existen desde antes de 1985-1986.

Bosque nuevo: incluye a) áreas que en mapas posteriores a 1985-1986 fueron clasificadas como bosque y que en mapas anteriores no fueron clasificadas como bosque o b) áreas que en 1985-1986 estaban

---

clasificadas como bosque secundario. Según se detalla en la sección de metodología también incluye las plantaciones forestales. A partir de estos criterios, y el análisis de los mapas pared a pared, estos bosques nuevos se clasificaron según cohortes de edad. Para efectos de este documento se utilizan los términos bosques nuevos y bosques secundarios como sinónimos.

Depósitos forestales de carbono: es la cantidad de carbono que se ha secuestrado de la atmósfera y se almacena dentro del ecosistema forestal, es decir, es la cantidad de carbono en el sistema en un momento dado expresado en masa por unidad de superficie terrestre  $tC\ ha^{-1}$  (toneladas de carbono por hectárea). Para efectos de comparación con emisiones y remociones, se expresan según su masa en  $CO_2$  mediante la multiplicación por la ratio de masa molecular entre  $CO_2$  y  $C$  de 44/12. En el presente documento se utilizan los términos depósitos forestales de carbono, existencias de carbono en bosques, carbono almacenado en bosques y stock de carbono como sinónimos.

Reservorios forestales de carbono: se refiere a los distintos componentes del sistema que incluyen biomasa aérea arbórea (BARA), biomasa subterránea arbórea (BARS), madera muerta aérea (MMA) y hojarasca (H).

Sumideros de carbono: cualquier sistema que causa una transferencia (remoción) de  $C$  desde la atmósfera al sistema.

Fuentes de carbono: cualquier sistema que causa una transferencia (emisión) de  $C$  desde el sistema a la atmósfera.

Remoción: transferencias de  $CO_2$  desde la atmósfera al sistema (en este caso el bosque y sus reservorios).

Emisión: transferencias de  $CO_2$  desde el sistema (en este caso el bosque y sus reservorios) hacia la atmósfera.

Fuentes de emisiones de GEI: cualquier proceso o actividad que libera GEI hacia la atmósfera. En el contexto de ecosistemas forestales, la deforestación y la degradación forestal son las principales fuentes de estas emisiones, pues ocasionan la liberación del carbono almacenado en los bosques en forma de  $CO_2$  y otros GEI.

$CO_2e$  (CO2 equivalente): con el objetivo de expresar las emisiones en términos de otros GEI (además del mismo  $CO_2$ ) por convención se utilizan las  $tCO_2\ ha^{-1}$  (toneladas de CO2 equivalente) que combina el efecto de varios GEI.

Deforestación: eliminación de superficie forestal. Para efectos prácticos, en este trabajo el término deforestación se utiliza para referirse a píxeles que cumplían con la definición de bosque en un momento  $t$  y en el momento  $t2$  no cumplen con dicha definición, es decir, son hectáreas de bosque que dejaron de ser bosque. Son áreas de bosque que fueron removidas a causa de perturbaciones inducidas por actividades humanas u otros procesos naturales. Esto no implica necesariamente una actividad ilegal.

Reforestación: aparición de superficie forestal. Para efectos prácticos, en este trabajo el término reforestación se utiliza para referirse a píxeles que no cumplían con la definición de bosque en un

---

momento  $t$  y en el momento  $t_2$  sí cumplen con dicha definición, es decir, son hectáreas que no eran bosque y se convirtieron en bosque.

Fuente: Elaboración propia con base en Morison et al. (2012), FAO (2013) y Pedroni y Villegas (2016).

---

## **Actualización de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica y la herramienta FREL & MRV TOOL**

Según se mencionó anteriormente, la última versión publicada de la base de densidades de carbono contiene una compilación de datos hasta el 2015, por este motivo y como punto de partida en esta investigación, la base fue actualizada con publicaciones realizadas hasta el 2020. Este proceso ocurre mediante una combinación de búsquedas en internet; revisión de publicaciones nuevas en la Biblioteca IICA/CATIE y repositorios TEC, UNA, UCR, EARTH, CATIE, ORTON y biblioteca nacional; además de una consulta directa a instituciones vinculadas con la materia. En conjunto, entre los datos recopilados previamente y este proceso de actualización, la base recopila 484 estimaciones de densidades de carbono (incluyendo las del INF) que pasaron por un proceso de clasificación y homogeneización según usos y estratos.

En el caso de tierras forestales, la revisión de los datos compilados mostró que solo era posible obtener estimaciones para bosques primarios. Según se detalla más adelante, para bosques nuevos o secundarios se utilizan modelos dinámicos que permitan considerar las cohortes de edad de dichos bosques. Para el caso de las plantaciones forestales, según se menciona anteriormente, estas se agregan con los bosques secundarios en la categoría de bosques nuevos. Esto implica el supuesto de que tienen factores de absorción iguales a los bosques secundarios.

Así, en el caso de bosque primarios, para el reservorio de biomasa aérea arbórea (BARA) se utiliza una media ponderada de carbono (t C/ha) de los valores por superficie muestreada con el fin de reducir la influencia de valores extremos. En los casos de madera muerta aérea (MMA) y hojarasca (H) se utiliza la media aritmética de los valores de la base de datos. En lo que respecta a la biomasa subterránea arbórea (BARS), en la revisión de literatura se pudo constatar que en la mayoría de los casos se usan valores por defecto del IPCC u otras publicaciones, por tanto, no se utilizan las mediciones directas, sino que se aplicó en todos los estratos la ecuación de Cairns et al. (1997). El cuadro 1 muestra los valores estimados para estos bosques a partir de la base de datos de densidades de carbono.

### **Cuadro 1**

#### **Existencias de carbono en bosques primarios según reservorio (t C/ha)**

<b>Estrato</b>	<b>BARA</b>	<b>MM</b>	<b>H</b>
Bosques muy húmedos y pluviales	131,5	13,5	2,7
Bosques húmedos	90,1	13,2	2,2
Bosques secos	61,1	15,4	6,2
Manglares	72,2	1,9	0,3

Estrato	BARA	MM	H
Bosques de palma	51,7	1,6	0,3

Fuente: Elaboración propia con datos de la versión actualizada de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica (Minae, 2019b).

La base de datos también incluye estimaciones para los otros usos: humedales, cultivos, pastizales y otras tierras. En el caso de cultivos permanentes, debido a los altos niveles de variabilidad por los distintos tipos de cultivos considerados en la base, los valores de carbono fueron estimados a partir de una media ponderada por el área de cada cultivo, para así obtener un valor único de stock de carbono para dicha categoría. Este valor es la referencia para estimar las existencias de carbono según cohorte de edad del cultivo. Para los cultivos anuales, debido a la falta de datos se utiliza el valor por defecto del IPCC. Las existencias de carbono en pastizales se estimaron por el valor promedio de los reservorios incluidos en la base de datos. Para los casos de áreas urbanas, humedales y tierras desnudas (incluidas en la categoría de otras tierras), debido a la falta de datos sobre estimaciones de carbono, se asumen valores de cero existencias de carbono. En el caso de otras tierras clasificadas como páramos se incluyen los valores promedio reportados en la base. Los resultados finales de las densidades para estas categorías se presentan en el cuadro 2.

#### Cuadro 2

##### Existencias de carbono en usos no forestales según reservorio ( $t C/h$ )

Uso	BARA	BNAA	MM	H
Cultivos anuales	-	-	-	-
Cultivos permanentes	15,8	7,1	0,3	2,7
Pastizales	7,8	3,9	2,3	0,00
Áreas urbanas	-	-	-	-
Humedales	-	-	-	-
Otras tierras	-	34,6	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos de la versión actualizada de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica (Minae, 2019b).

Con la versión actualizada de la base y las estimaciones presentadas anteriormente, se obtienen los parámetros que son utilizados en la *herramienta NRE/MRV*. De esta forma, la herramienta consolida los datos de los parámetros y estimaciones de carbono por hectárea para cada uso, estrato y reservorio. Además, para efectos de las interpretaciones y la comparación con datos de emisiones, los valores se convierten de  $C a CO_2$ .

Para los bosques primarios, se utilizan los valores por defecto de la herramienta que son utilizados para el nivel de referencia nacional. Estos están basados en el INF con un ajuste por degradación. En esta herramienta también se hacen los cálculos de carbono para bosques nuevos (que incluyen bosques secundarios y plantaciones forestales). Para estos la herramienta

utiliza un modelo dinámico, específicamente con curvas de acumulación de biomasa estimadas para bosques secundarios (para bosques muy húmedos y pluviales, húmedos y secos) basadas en versiones modificadas de los modelos de Cifuentes (2008) y los parámetros de la base de datos de densidades, que permiten tener estimaciones de carbono almacenado por clase de edad. Por otro lado, para los bosques secundarios de los estratos manglares y bosques de palma, debido a la inexistencia de datos específicos, las estimaciones se llevan a cabo mediante un supuesto de acumulación lineal de biomasa donde el valor máximo es la densidad de carbono de un bosque primario y el mínimo es cero. Otro supuesto relevante para las estimaciones en bosque secundario, es que se utiliza un valor máximo de biomasa igual al valor máximo promedio de los bosques primarios de cada estrato.

El cuadro 3 muestra el resumen de los valores promedio de carbono por hectárea que serán utilizadas para la estimación de los depósitos de carbono, emisiones y remociones en las siguientes etapas del trabajo.

**Cuadro 3**

Valores promedio de existencias de carbono según uso, estrato, cohorte de edad y reservorio (tCO<sub>2</sub>-e ha<sup>-1</sup>)

				BARA	BNAÁ	MM	H	Existencia total
Bosques muy húmedos y pluviales	Primario			313,69	71,97	49,50	10,05	445,21
	Nuevo	Cohortes de edad	4	34,57	9,35	3,75	0,36	12,60
37			239,89	56,15	26,03	2,47	324,54	
Bosques húmedos	Primario			203,99	48,32	48,27	8,01	308,59
	Nuevo	Cohortes de edad	4	42,95	11,42	4,96	0,83	60,16
37			239,31	56,02	27,65	4,62	327,60	
Bosques secos	Primario			199,19	47,27	56,47	22,73	325,66
	Nuevo	Cohortes de edad	4	1,24	0,43	0,15	0,12	1,93
37			207,05	48,99	24,83	20,00	300,87	
Manglares	Primario			253,74	59,14	6,95	0,97	320,80
	Nuevo	Cohortes de edad	4	10,15	3,01	0,26	0,03	13,44
37			93,88	23,56	2,40	0,25	120,10	
Bosque de palma	Primario			229,81	53,96	5,97	0,96	290,69
	Nuevo	Cohortes de edad	4	9,19	2,74	0,29	0,05	12,27
37			85,03	21,50	2,68	0,43	109,63	
Cultivos	Anuales			-	-	-	-	22,92
	Permanentes	Cohortes de edad	4	38,54	10,33	0,81	5,06	77,04
37			57,81	15,04	1,22	7,59	114,89	
Pastizales				28,48	7,81	8,28	0,00	62,92
Áreas urbanas				-	-	-	-	-
Humedales				-	-	-	-	-
Otras tierras	Páramos			-	-	-	-	158,00
	Suelos desnudos			-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos de la herramienta NRE/MRV (Minae, 2019b).

## **Análisis espacial y temporal de depósitos de carbono**

La segunda etapa de la investigación es el análisis de la distribución espacial y comportamiento en el tiempo de los depósitos de carbono de los bosques del país. Para esto se estima el valor de depósitos de carbono a partir de la siguiente ecuación 1 (basada en REDD+, 2021):

$$C_t = \Sigma C_{tot} \quad \text{(ecuación 1)}$$

Donde:

$C_t$  es la estimación de los depósitos de carbono en el momento t medida en  $\text{tCO}_2\text{-e ha}^{-1}$

$C_{tot}$  es la suma de las existencias de carbono por hectárea para los distintos reservorios en ese mismo momento:  $C_{tot} = C_{BA} + C_{BS} + C_{MM} + C_H$ . Donde  $C_{BA}$  es el carbono en la biomasa aérea,  $C_{BS}$  es el carbono en la biomasa subterránea,  $C_{MM}$  es el carbono en biomasa madera muerta y  $C_H$  es el carbono en la hojarasca.

A partir de esa ecuación, se estiman los depósitos de carbono en bosques tomando los valores de existencias de carbono por hectárea y reservorio, para cada estrato, tipo de bosque y cohortes edad, que son obtenidos con la versión actualizada de la *herramienta NRE/MRV*. Luego estos valores se asignan a la serie histórica de mapas de cobertura del suelo de REDD+, específicamente en la capa de tierras forestales. Posteriormente se realizan las estimaciones de carbono píxel a píxel, de manera que el ejercicio, que combina los mapas y las densidades de carbono por hectárea, permite espacializar el análisis al mismo tiempo que se puede analizar la temporalidad de los datos.

Dado que los bosques nuevos de la serie histórica de mapas de cobertura del suelo de REDD+ se clasifican en cohortes de edad que responden a los rangos comprendidos entre cada momento del análisis de coberturas (a saber, cohortes de edad de bosques que aparecieron entre los años 1986 y 1991, entre 1992 y 1997, entre 1998 y 2000, y así sucesivamente) se utilizan los valores promedio de carbono para cada edad obtenidos de la *herramienta NRE/MRV*. Además, las estimaciones consideran una edad mínima de detección en imágenes satelitales de 4 años (para bosque muy húmedo, pluvial, húmedo y manglar) y 8 años (para bosque seco) según criterio de experto del IMN (MINAE, 2019b). Así, por ejemplo, en el mapa de cobertura del año 2015, los bosques clasificados con cohorte de edad 1986 a 1991, podrían tomar valores de carbono correspondientes a bosques secundarios que van desde los 27 hasta los 32 años. En estos casos se utilizan los valores promedio de carbono para las edades comprendidas en ese rango. Esta misma lógica se aplica para todos los estratos, cohortes de edad y momentos de análisis.

Por otro lado, para la cohorte de edad de bosques anterior al año 1986, siguiendo un principio conservador, se utiliza el valor de carbono promedio de la edad mínima de los bosques según el momento. Así, retomando el ejemplo del 2015, los bosques de la cohorte de edad anterior al año 1985 podrían tomar valores de carbono de 30 años en adelante, sin embargo, para el análisis de depósitos de carbono se toma el valor mínimo, es decir, las existencias de carbono promedio estimadas para dicho bosque a los 30 años. Es importante destacar que este supuesto tiene implicaciones importantes, sobre todo para la estimación de los depósitos de carbono en las primeras cohortes. En el caso de la cohorte de 1986, dado que se desconoce la edad de los

bosques clasificados como secundarios, se utiliza el criterio de la edad mínima. Como estos bosques pueden tomar valores de existencias de carbono que van entre los 4 años hasta los valores máximos equivalentes a los de un bosque primario, se toma el valor de *stock* de carbono de 4 años. Esto indiscutiblemente implica una subestimación de los depósitos que se acentúa en las primeras cohortes, sin embargo, para esta decisión metodológica se prioriza el criterio conservador que permita definir un punto de partida para efectos del análisis.

Como resultado de este paso, se generan una serie de mapas de depósitos de carbono que permiten realizar un análisis espacial y temporal para identificar patrones sobre la ubicación y comportamiento a través del tiempo del *stock* de carbono existente en el territorio nacional.

### **Análisis espacial y temporal de las emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal**

Las emisiones y remociones se estiman a partir de los cambios en los depósitos de carbono de los bosques. Estos cambios en el uso del suelo representan un proxy para estimar los efectos antropogénicos. Así, la combinación de los mapas de depósitos de carbono generados en el paso previo, en conjunto con el análisis de cambios en los mapas de cobertura permite generar información espacialmente explícita sobre emisiones y remociones de carbono en el territorio (Frédéric, 2014; Harris et al., 2012). Al analizar sistemáticamente la coincidencia entre las áreas de pérdida o ganancia de bosques, con sus reservas de carbono antes de la tala o surgimiento de cobertura, es posible la identificación de patrones espaciales y temporales asociados con las reducciones y aumentos de carbono derivados de estos cambios.

Siguiendo lo establecido por el IPCC (IPCC, 2019) y en línea con las estimaciones que realiza REDD+ para Costa Rica (REDD, 2021), se utiliza un acercamiento basado en depósitos de carbono (*stock-based*) que estima las diferencias en las existencias de carbono entre dos momentos para un área dada. Para esto, es de vital importancia que ambas capas espaciales cubran el mismo terreno, tengan la misma resolución en píxeles, se encuentren en el mismo sistema geográfico de referencia y tengan la misma clasificación de usos de suelo. El uso de los datos de la serie histórica de REDD+ asegura el cumplimiento de estos criterios para así garantizar la consistencia en los análisis y estimaciones.

Las estimaciones de los cambios en los depósitos de carbono siguen la siguiente ecuación (basada en IPCC, 2019 y REDD, 2021):

$$\Delta C = C_{t2} - C_{t1} \quad \text{(ecuación 2)}$$

Donde:

$\Delta C$  es el cambio en las existencias de carbono medido en  $\text{tCO}_2\text{-e ha}^{-1}$  que está asociado con la transición de un uso de suelo a otro

$C_{t1}$  corresponde a los depósitos de carbono por hectárea en el momento  $t1$  (véase ecuación 1)

$C_{t2}$  corresponde a los depósitos de carbono por hectárea en el momento  $t2$  (véase ecuación 1)

Así, las pérdidas y ganancias de existencias de carbono se utilizan para estimar las emisiones y remociones de  $CO_2$  hacia y desde la atmósfera. Un cambio de signo positivo (+) en los depósitos de carbono es equivalente a un signo negativo (-) en emisiones, es decir, representa una remoción pues aumentan los depósitos de carbono. Por el contrario, un cambio de signo negativo (-) en los depósitos de carbono es equivalente a un signo positivo (+) en emisiones, es decir, representa una emisión pues disminuyen los depósitos de carbono. También pueden existir situaciones de estabilidad (sin cambios), es decir, cuando el uso de suelo y los depósitos se mantienen iguales entre ambos momentos.

Para efectos prácticos, en esta investigación las estimaciones se realizan mediante una comparación cartográfica entre momento y momento de los mapas de cobertura del suelo llevada a cabo mediante análisis locales píxel a píxel. A cada píxel se le asigna su respectiva estimación de depósitos de carbono, es decir, el valor de la existencia promedio por hectárea estimada para cada momento, uso, estrato, tipo de bosque y cohorte de edad (según se detalla en el primer paso de la metodología). Así, tanto para las tierras forestales, como para los usos de suelo no forestales (pastos, cultivos, áreas urbanas, humedales y otras tierras) se utilizan las estimaciones de carbono detalladas en la tabla 3. Luego se estiman las diferencias según la ecuación 2 para así obtener una espacialización de las emisiones y remociones. Finalmente, se estima el balance neto considerando las diferencias entre emisiones y remociones.

Estos resultados se exploran según su asociación con los principales usos vinculados a actividades humanas. Concretamente se analizan los patrones espaciales y temporales de las emisiones por deforestación por la pérdida de bosques que fueron sustituidos por pastos (como un proxy de actividad ganadera), cultivos (como proxy del sector agro) y uso urbano.

Para efectos de la presentación de resultados, dado que los cambios se estiman mediante análisis “pared a pared” entre las cohortes de la serie histórica de mapas, estos se anualizan bajo el supuesto de que las emisiones y remociones se distribuyen de manera equitativa entre los años comprendidos en cada período. En otras palabras, los valores se dividen entre el número de años contenidos entre cohorte y cohorte.

### **Escenario de depósitos de carbono ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas**

Una investigación reciente realizada en conjunto por investigadores de REDD+ Costa Rica y el Catie (Obando et al., 2021) llevó a cabo una validación de las estimaciones de biomasa del INF del país. Entre otros análisis, los autores realizan una evaluación de la estratificación que utiliza dicho inventario. Para esto utilizan técnicas de análisis de varianzas considerando los tipos de bosque<sup>vii</sup> y otras capas de información geográfica como las zonas de vida, áreas protegidas, entre otras. Los resultados evidencian que la capa de información de área protegida presenta una diferencia significativa según los tipos de bosque primario y secundario. De esta forma, uno de los hallazgos principales de dicho trabajo es que la estimación de la biomasa dentro de áreas protegidas casi se duplica en bosques secundarios y es más del doble en primarios (cuadro 4). Es importante destacar que estos resultados coinciden con los del INF (Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC, 2015), que reporta un promedio de 381 t/ha de carbono en áreas protegidas y 201 t/ha en áreas no protegidas, es decir, se identifican valores promedio 1,89 veces mayores en

áreas protegidas. A partir de estos resultados, los autores recomiendan utilizar la información geográfica de las áreas protegidas como una sub-estratificación para los bosques.

#### Cuadro 4

Existencias de carbono (t/ha) por área protegida y no protegida, según tipos de bosque

Estrato	Protegida	No protegida	Relación (veces)
Bosque primario	261,37	96,29	2,71
Bosque secundario	145,28	73,30	1,98

Fuente: Obando et al. (2021) con datos del INF (Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC, 2015).

A raíz de dichos hallazgos, en la presente investigación se lleva a cabo un ejercicio exploratorio bajo un escenario ajustado basado en los resultados de Obando et al. (2021), cuyo objetivo es analizar los depósitos de carbono considerando estas diferencias en las existencias de carbono en ecosistemas forestales dentro y fuera de áreas protegidas, tanto en bosques primarios como secundarios. Para esto se consideran los siguientes supuestos. En el caso de los bosques primarios, dado que las estimaciones realizadas en la *herramienta NRE/MRV* también provienen del INF, se utilizan los valores de existencias de carbono dentro y fuera de áreas protegidas estimados por Obando et al. (2021). Para los bosques secundarios, dado que las estimaciones se efectúan con los modelos de Cifuentes (2008) y no del INF, y además considerando un criterio conservador, para bosques dentro de área protegida se toman los mismos valores de la *herramienta NRE/MRV*. Sin embargo, para los bosques fuera de área protegida, la estimación de carbono se divide según la relación determinada por Obando et al. (2021), es decir, 1,98. Dado que el análisis de varianza realizado por estos autores indica que para manglares y bosques de palma no hay diferencia estadísticamente significativa al distinguir entre áreas protegidas o no protegidas, en estos dos casos se mantienen los mismos valores dentro y fuera de área protegida. El cuadro 5 resume los valores que serán utilizados en este escenario y su comparación con respecto a los del paso anterior.

## Cuadro 5

### Existencias de carbono del escenario ajustado por áreas protegidas (tCO<sub>2</sub>-e ha<sup>-1</sup>)

				Escenario ajustado		Datos REDD+ (Herramienta NRE/MRV)
				Protegida	No protegida	
Bosques muy húmedos y pluviales	Primario			450,43	165,94	445,21
	Nuevo	Clases de edad	4	48,03	24,23	48,03
37			324,54	163,74	324,54	
Bosques húmedos	Primario			450,43	165,94	308,59
	Nuevo	Clases de edad	4	60,16	30,35	60,16
37			327,60	165,29	327,60	
Bosques secos	Primario			450,43	165,94	325,66
	Nuevo	Clases de edad	4	1,93	0,97	1,93
37			300,87	151,80	300,87	
Bosques de palma	Primario			217,23	217,23	290,69
	Nuevo	Clases de edad	4	12,27	12,27	12,27
37			109,63	109,63	109,63	
Manglares	Primario			252,69	252,69	320,80
	Nuevo	Clases de edad	4	13,44	13,44	13,44
37			120,10	120,10	120,10	

Fuente: Elaboración propia con base en Obando et al. (2021) con datos del INF (Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC, 2015) y la herramienta NRE/MRV (Minae, 2019b).

Como resultado de este ejercicio exploratorio, se generan versiones alternativas de los mapas de depósitos de carbono construidos en el primer paso de la metodología. Estas versiones consideran este ajuste, que da cuenta de las diferencias en las existencias de carbono en bosques ubicados dentro y fuera de áreas protegidas.

### Limitaciones metodológicas y de las fuentes de información

Esta sección detalla algunas limitaciones metodológicas y de las fuentes de información, que son relevantes previo a la interpretación de resultados. En primer lugar, es importante aclarar que, al igual que en la mayoría de investigaciones en este campo, los análisis realizados se basan en una serie de supuestos para modelar los depósitos de carbono, emisiones y remociones. Estos son necesarios para poder generar estimaciones para un sector tan complejo como el forestal y se detallan en las secciones previas de la metodología. Además, los análisis se desarrollan con las mejores fuentes disponibles según los objetivos del estudio y siguiendo, hasta donde ha sido posible, las metodologías del nivel de referencia del país y los estándares del IPCC.

Por otro lado, existen consideraciones importantes sobre el uso de datos del INF para la estimación de las densidades de carbono. Si bien es cierto, este reporte constituye el esfuerzo oficial más reciente para estimar las existencias de recursos forestales en el país, presenta limitaciones en cuanto la información disponible<sup>viii</sup> y distribución desigual de las parcelas en los distintos estratos (Pedroni y Villegas, 2016; REDD, 2021). Por este motivo, siguiendo la metodología del nivel de referencia del país, se complementa con una revisión de literatura que se recopila en la *base de datos de densidades de carbono* y posteriormente es utilizada para definir los parámetros de la *herramienta NRE/MRV*.

Además, existen limitaciones en las estimaciones de carbono asociadas con los reservorios contemplados en el análisis, particularmente por la no consideración del carbono orgánico del suelo. Ciertamente este reservorio constituye un componente de gran importancia en materia de contabilidad de carbono, sin embargo, al igual que ocurre para las estimaciones del nivel de referencia, dicho reservorio se excluye de las estimaciones debido a la falta de datos confiables a escala nacional (Pedroni y Villegas, 2016). Según estos autores, el peso estimado de este reservorio en las emisiones totales no supera el 10%. Además, según los pocos datos disponibles, las tasas de cambio de contenido de carbono en el suelo no son significativas en la mayoría de las transiciones de cambios de uso del suelo. Por otro lado, otros autores como Harris et al. (2012) también excluyen este reservorio y consideran únicamente la biomasa aérea y subterránea, que en general representa entre el 70% y 90% del carbono en estos ecosistemas forestales. Además, señalan que un análisis llevado a cabo con la poca información disponible muestra que la contabilidad del carbono del suelo incrementa las estimaciones de emisiones apenas un 5%. Por su parte, los datos del INF estiman que el peso de este reservorio es relevante en el caso de las estimaciones de los depósitos de carbono.

De esta forma, las dificultades de medición de este reservorio con modelos adecuados a la realidad de cada bosque y zona de vida, así como la poca disponibilidad de información confiable, hace que sea comúnmente excluido en estudios de estimación de biomasa y carbono (Fonseca, 2017). Así, en general, la exclusión de este reservorio da como resultado estimaciones conservadoras de los depósitos, emisiones y remociones.

Otra limitación importante es la exclusión de los procesos de degradación forestal en el análisis. El estudio se concentra en aproximar la deforestación, reforestación y el aumento de existencias de carbono debido al crecimiento de bosques nuevos (bosques secundarios) que se mantienen como bosques, sin embargo, debido a las dificultades técnicas y disponibilidad de información, no incluye la degradación. Estos procesos se representan con categorías de bosque que permanecen iguales y que resultan complicados de detectar con imágenes satelitales, pues causan un cambio menos drástico en la cobertura debido a la pérdida de algunos árboles (pero manteniendo la misma categoría). En otras palabras, es una pérdida de biomasa, y por tanto de carbono, en bosques que permanecen como bosques. Esto implica la utilización de técnicas distintas que escapan del alcance de la presente investigación. Aun así, es importante considerar que la degradación es generalmente una fase inicial en la pérdida de bosques (Numata et al., 2010).

En el caso de Costa Rica, el aporte de la degradación forestal en las emisiones ha venido en aumento (REDD, 2021). De hecho, las estimaciones indican que entre los años 1998 y 2011, la degradación representó solo 29,6% de las emisiones, mientras que la deforestación 70,4% de los gases liberados a la atmósfera. Pero para el año 2019, el aporte de la degradación aumentó considerablemente hasta llegar a 74,9%. Así, aunque es innegable que el peso de la degradación en las emisiones es importante (principalmente en los últimos años de la serie), dado que el marco temporal de análisis de esta investigación abarca un período de 34 años entre 1986 y 2019, el peso de la deforestación también es muy significativo, sobre todo al inicio del período. Aun así, es importante aclarar que la exclusión de la degradación se traduce en una

subestimación de las emisiones totales. Por tanto, cuando se utiliza el término emisiones en este trabajo, se refiere exclusivamente a las emisiones por deforestación.

## **Incertidumbre**

El sector AFOLU posee una serie de características únicas que hacen que las estimaciones de emisiones, remociones y existencias de carbono sean un tema complejo. La gran cantidad de procesos simultáneos y dispersos en el tiempo y espacio, así como la influencia directa e indirecta de factores que pueden tener orígenes naturales o antropogénicos, son algunas de las particularidades que deben ser consideradas al momento de trabajar inventarios en este sector (IPCC, 2019). Por este motivo, la cuantificación de las incertidumbres es un tema central en este tipo de esfuerzos. Estas mediciones permiten aproximar en cuánto difieren las emisiones y absorciones reales de las estimaciones realizadas en inventarios nacionales. Aun así, según el IPCC (IPCC, 2021) la información de incertidumbre no debe estar orientada a cuestionar la validez de las estimaciones, sino a priorizar esfuerzos para mejorar la exactitud de las estimaciones a futuro y la toma de decisiones metodológicas.

Aunque este trabajo no pretende ser un inventario, y más bien sigue una lógica distinta orientada a la identificación de patrones y tendencias espaciales y temporales, dado que las fuentes utilizadas siguen los lineamientos del IPCC, estas presentan estimaciones de incertidumbre. Por otro lado, es importante destacar que el uso de datos de densidades de carbono provenientes en su mayoría de estudios científicos realizados en el país y el INF, implica una reducción en los niveles de incertidumbre. A continuación, se presenta un resumen de las estimaciones de incertidumbre de las fuentes utilizadas en esta investigación.

En primer lugar, la incertidumbre de los datos de cambios en uso del suelo para estimación de emisiones y remociones, así como los valores de hectáreas utilizadas para estimar los depósitos de carbono, provienen de las incertidumbres asociadas con los mapas de la serie histórica de cobertura del suelo (Minae, 2019b). Estos son sometidos a un proceso de revisión de calidad y validación que incluye entre otros aspectos (REDD; 2021): vista previa y verificación de la calidad de la imagen satelital y metadatos por parte del analista responsable de la descarga de imágenes de soporte y del supervisor; validación del error cuadrático medio (RMSE) de los puntos de control, por parte del analista responsable de la ortorrectificación; validación de máscaras de nubes y sombras mediante la verificación visual de una cuadrícula aleatoria sistemática de puntos de control; proceso iterativo de clasificación, verificación de resultados, detección de errores y revisión de áreas y puntos de capacitación; verificación visual de los mapas generados luego de llenar los vacíos con datos globales; y ediciones manuales, revisiones visuales y revisiones con fotointerpretación.

Por otro lado, según se detalla en Agresta-Dimap-UCR-UPM (2015), se lleva a cabo una validación de los mapas mediante fuentes de puntos de control. Como resultado se obtienen valores de exactitud de la clasificación de 86% para el mapa del 2013, 92% para el mapa del 2001 y 88% para el mapa de 1987. Otras estimaciones de incertidumbre basada en los lineamientos de Olofsson et al (2014) estiman valores para el período de referencia 1998-2011 y los últimos mapas de la serie 2018-2019 (cuadro 6).

## Cuadro 6

### Incertidumbre estimada para mapas de cobertura

Incertidumbre	1998-2011	2018-2019
Hectáreas deforestadas	26%	6%
Hectáreas de otros usos convertidas en bosques	31%	8%
Hectáreas que se mantienen como bosques	4%	1%

Fuente: Elaboración propia con base en REDD (2021).

La segunda fuente de incertidumbre está asociada con los factores de emisión, es decir, las existencias de carbono utilizadas para la estimación de los depósitos, emisiones y remociones. El cuadro 7 resume los valores de incertidumbres al 90% de confianza en  $\text{tCO}_2 \text{ ha}^{-1}$  para cada uno de los reservorios, usos, estratos y cohortes de edad. En términos generales, es importante considerar que la incertidumbre de la densidad de biomasa representa el 69% de la incertidumbre total de la estimación de las reducciones de emisiones, este es un tema que requiere especial atención, para así, a futuro, lograr avances metodológicos que permitan disminuir esta incertidumbre y lograr resultados más precisos.

## Cuadro 7

### Incertidumbre de las densidades de carbono al 90% de confianza ( $\text{tCO}_2\text{-e ha}^{-1}$ )

			BARA	BNAA	MM	H	Existencia total
Bosques muy húmedos y pluviales	Primario		63,54	14,58	8,75	0,94	65,78
	Nuevo	Cohortes de edad	4	2,91	0,79	0,32	0,08
		37	19,72	4,61	2,14	0,59	20,37
Bosques húmedos	Primario		41,86	9,92	23,25	1,04	48,91
	Nuevo	Cohortes de edad	4	3,35	0,89	2,36	0,13
		37	19,44	4,55	13,18	0,73	23,93
Bosques secos	Primario		-	-	21,92	0,61	21,93
	Nuevo	Cohortes de edad	4	0,10	0,03	0,04	0,01
		37	16,59	3,93	7,11	1,71	18,55
Manglares	Primario		31,83	7,42	2,05	0,24	32,75
	Nuevo	Cohortes de edad	4	1,27	0,38	0,1	0,03
		37	11,78	2,96	0,90	0,26	12,18
Bosque de palma	Primario		25,03	5,88	7,02	1,13	26,68
	Nuevo	Cohortes de edad	4	1,00	0,30	0,36	0,05
		37	9,26	2,34	3,35	0,51	10,14
Cultivos	Anuales		-	-	-	-	9,99
	Permanentes	Cohortes de edad	4	27,20	7,29	0,29	2,41
		37	40,8	10,62	0,43	3,61	46,14
Pastizales			-	-	6,29	-	6,29
Áreas urbanas			-	-	-	-	-
Humedales			-	-	-	-	-
Otras tierras	Páramos		-	-	-	-	2,23
	Suelos desnudos		-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos de la herramienta NRE/MRV (Minae, 2019b).

## Resultados

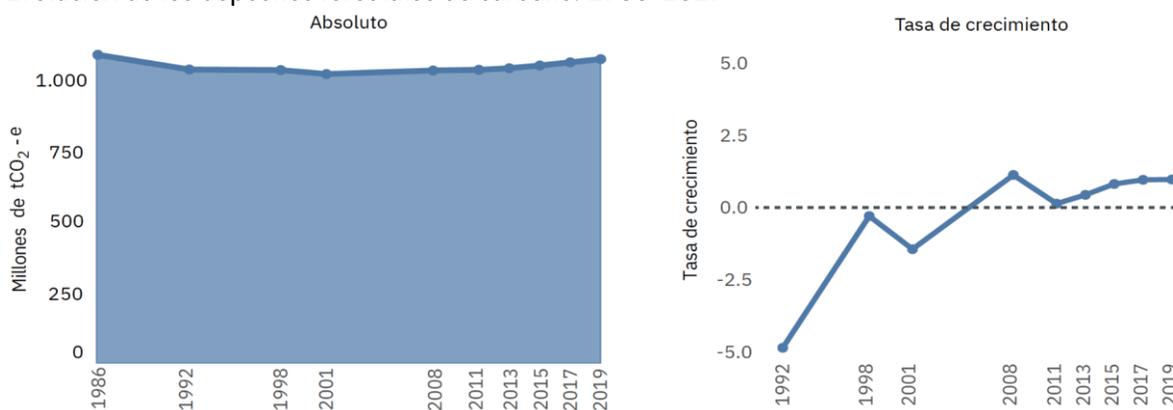
### Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono

Entre los años 1986 y 2019, se estima que los depósitos forestales de carbono a nivel nacional alcanzaron un valor promedio de 1.055 millones de tCO<sub>2</sub>-e. Estos depósitos muestran una tendencia de relativa estabilidad a lo largo de las más de tres décadas analizadas, sin embargo, este comportamiento es el resultado de la combinación de pérdidas y ganancias en el stock de carbono que han ocurrido a través del tiempo y no se han distribuido de manera equitativa en el territorio. Como producto de esta asimetría, se identifican áreas del país con un deterioro de sus existencias forestales de carbono, mientras que otras regiones han logrado incrementar su stock. En algunas zonas se registran pérdidas de depósitos que no se han logrado recuperar y, para hacerlo, probablemente se necesitarían cientos de años. Por otro lado, la recuperación de existencias ha ocurrido principalmente fuera de áreas protegidas, lo que plantea una situación de riesgos por la mayor vulnerabilidad asociada con bosques fuera de áreas protegidas.

Desde el punto de vista temporal, aunque las existencias de carbono presentan una relativa estabilidad, se observan algunas fluctuaciones (gráfico 1). La disminución más marcada se registra entre las dos primeras cohortes analizadas. Entre los años 1986 y 1992 los depósitos decrecieron en un -4,8%, lo que significó una reducción de 1.095,6 millones de tCO<sub>2</sub>-e a 1.043,5 millones de tCO<sub>2</sub>-e entre esos dos años. Luego de alcanzar su nivel más bajo de 1.027,4 millones de tCO<sub>2</sub>-e en el año 2001, se observa una recuperación que se acelera en los últimos seis años analizados, a saber, 2015 y 2019. Así, para el año 2019 se estima el stock de carbono nacional en 1.080,3 millones de tCO<sub>2</sub>-e.

Este patrón temporal, que inicia con una tendencia a la baja, seguida de un periodo de estabilidad y una posterior recuperación en los últimos años, muestra que aún no se alcanzan los niveles de depósitos forestales de carbono de finales de la década de los ochenta. Un análisis detallado de los posibles factores que han afectado este comportamiento, como por ejemplo las políticas en el ámbito forestal o cambios en las apuestas productivas de los territorios, es uno de los retos pendientes para futuras investigaciones.

Gráfico 1  
Evolución de los depósitos forestales de carbono. 1986-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

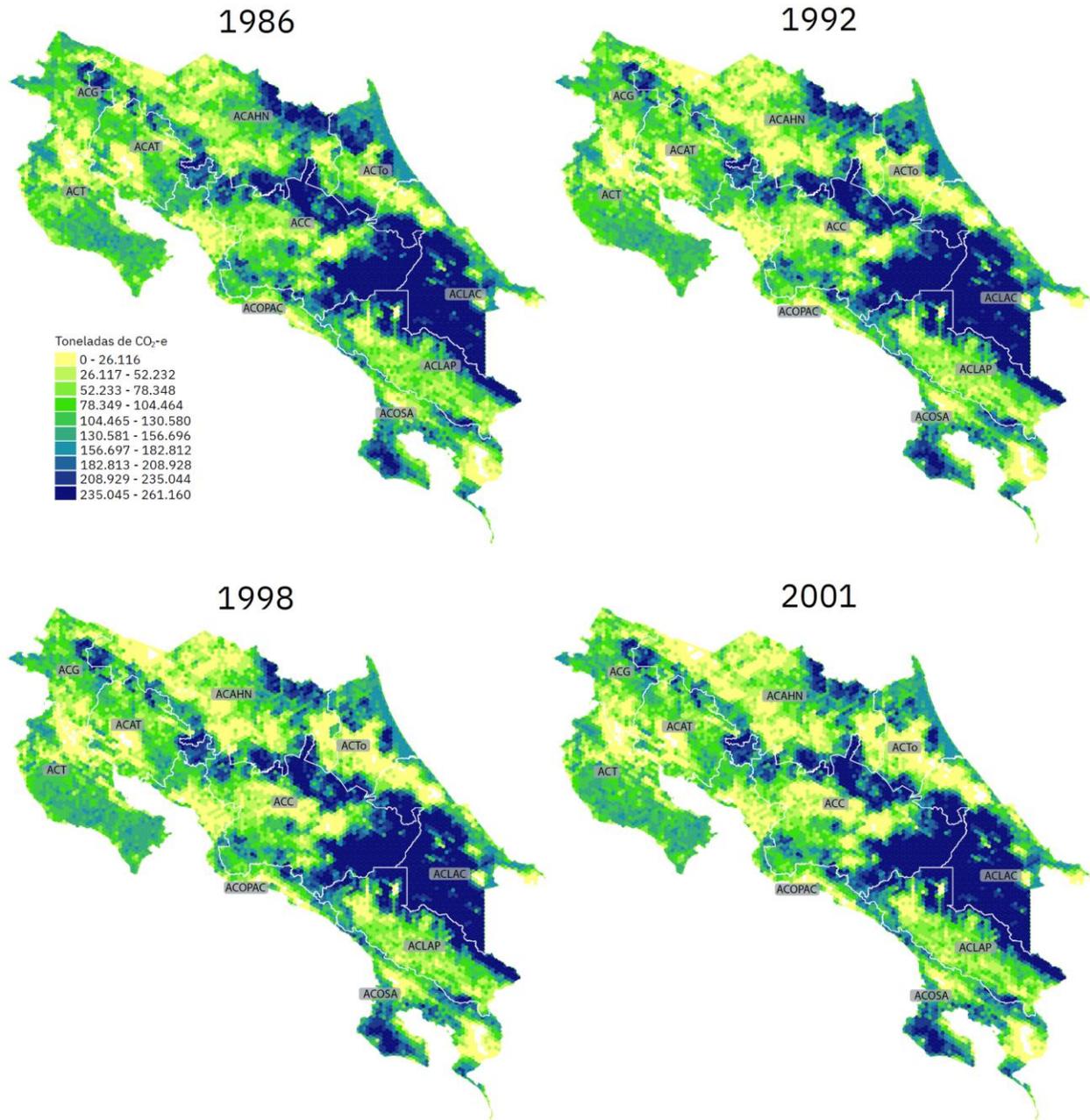
Por otro lado, desde la perspectiva espacial, se observa un patrón de concentración de estos depósitos en determinadas áreas de conservación, que además se ha mantenido a través del tiempo (mapa 1). Las áreas de conservación La Amistad Caribe (ACLAC) y Central (ACC) acumulan la mayor parte del *stock* nacional de carbono, con valores promedio entre los años 1986 y 2019 de 20,7% y 17,9% respectivamente. La ubicación de tres parques nacionales de gran extensión dentro de estas dos áreas de conservación, cómo lo son el Parque Nacional Chirripó, el Parque Nacional La Amistad y el Parque Nacional Braulio Carrillo, juegan un papel determinante en esta acumulación de existencias de carbono. A pesar de esto, también se identifican importantes concentraciones de sumideros fuera de los límites de estas áreas protegidas, específicamente en la periferia de estos parques nacionales (mapa 2). Estas condiciones posicionan ambas áreas de conservación como las de mayor potencial forestal de mitigación del cambio climático.

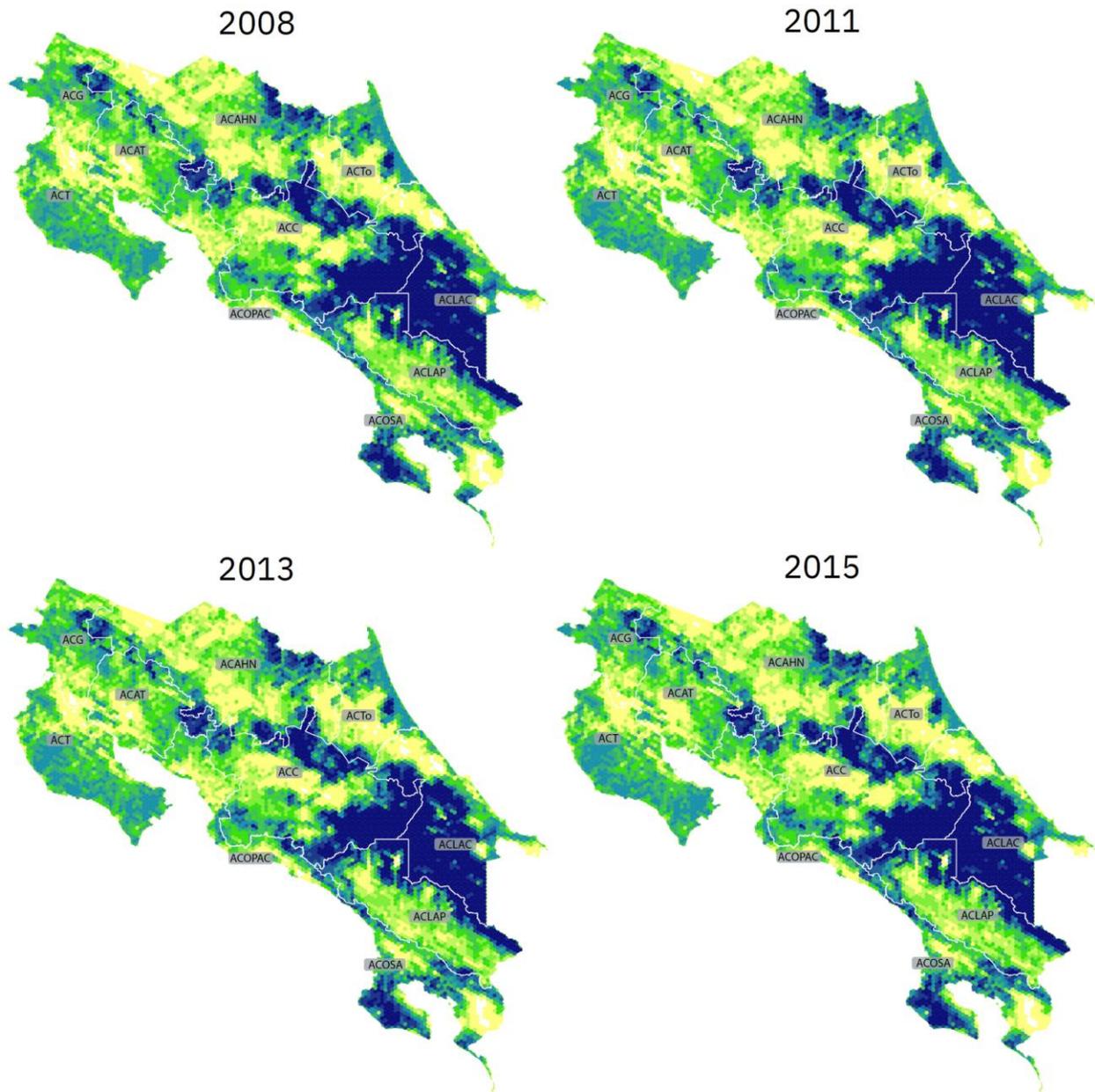
Las áreas Huetar Norte (ACAHN), La Amistad Pacífico (ACLAP), Tempisque (ACT) y Osa (ACOSA) muestran valores intermedios de existencias que oscilan entre el 13,2% y 8,8% del *stock* total nacional a lo largo del periodo. Finalmente, se identifican 4 zonas con los niveles más bajos de depósitos forestales de carbono (en promedio 4,8%) y menor potencial de mitigación del cambio climático, estas son, Tortuguero (ACTO), Arenal Tempisque (ACAT), Guanacaste (ACG) y Pacífico Central (ACOPAC).

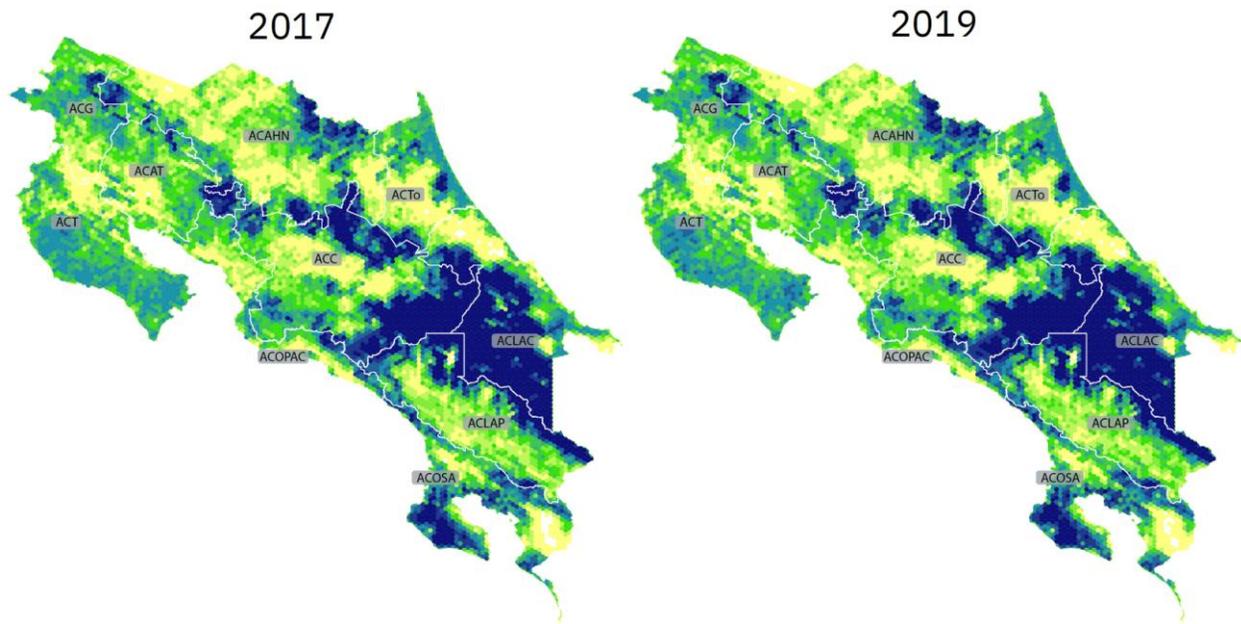
Este patrón está claramente asociado con la distribución de los bosques según su tipo (primario o secundario) y estrato (bosques muy húmedos y pluviales, húmedos, secos, manglares o bosques de palma). Las áreas de conservación con niveles más altos presentan un perfil con combinaciones importantes de bosque primario del estrato de bosque muy húmedo y pluvial, que poseen la mayor capacidad de almacenamiento de carbono por hectárea. Esto podría tener implicaciones importantes en términos de políticas de gestión de los recursos forestales. Dado que el perfil y distribución de los bosques en el territorio determina el nivel de depósitos de carbono, esfuerzos más localizados y enfocados en zonas con perfiles de mayor potencial pueden tener mayor impacto. Por ejemplo, estrategias enfocadas en zonas que albergan bosques muy húmedos y pluviales tendrían un mayor impacto (tanto en el corto como largo plazo) con respecto a otras localizadas en bosques secos o húmedos, pues su potencial de almacenamiento de carbono es distinto. Esto no significa que se deba descuidar la protección de los recursos que ya existen, ni dejar de procurar un aumento de cobertura con una distribución más equitativa en el territorio, pues es importante impulsar el potencial de mitigación en todas las zonas del país. Sin embargo, también es cierto que hay algunas zonas donde los esfuerzos pueden tener mayor impacto debido a sus condiciones naturales.

Mapa 1

Depósitos de carbono según área de conservación<sup>a/</sup>. 1986-2019 ( $tCO_2 - e ha^{-1}$ )







<sup>a/</sup>Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel. Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Si bien es cierto, en términos generales, tanto el nivel del stock de carbono, como su patrón de concentración espacial, se ha mantenido a través del tiempo, el análisis realizado muestra que estas tendencias son el resultado de una combinación de pérdidas y ganancias en los depósitos de carbono que han tenido lugar en distintas zonas y momentos. Los aumentos y disminuciones de este potencial forestal de mitigación del cambio climático no se han distribuido de manera homogénea en el territorio nacional.

Algunas regiones muestran un balance negativo. Por ejemplo, las dos zonas de mayor aporte en depósitos forestales de carbono, Central y La Amistad Caribe, registran una tendencia hacia la baja en sus depósitos, que se traducen en una pérdida estimada conjunta de 18,5 millones de tCO<sub>2</sub>-e (gráfico 2). Estas reducciones se reflejan también en el mapa 1. Si se comparan las cohortes de 1986 y 2019, se puede observar una transición hacia valores bajos en zonas ubicadas en áreas urbanas, como el Valle Central y sus alrededores. Pero también se identifica otro fenómeno, la pérdida de depósitos en zonas cercanas a los límites de algunos parques nacionales como el Parque Nacional La Amistad, el Parque Nacional Chirripó y el Parque Nacional Braulio Carrillo.

También destacan dos áreas donde la reducción es aún más marcada, a saber, Huetar Norte y Tortuguero. En conjunto se estima que la pérdida entre los años 1986 y 2019 para estas zonas fue de 50,2 millones de tCO<sub>2</sub>-e, que son el resultado de tasas negativas de crecimiento de magnitud considerable al inicio del período, con valores promedio de -13,5%. De esta forma, para el año 2019, el área de conservación Huetar Norte sufrió una reducción del 16,9% de sus depósitos con respecto a las existencias del año 1986, mientras que en el área de Tortuguero dicho valor alcanzó el 30,3% (gráfico 2). Así, se pueden notar sectores en el noreste del territorio

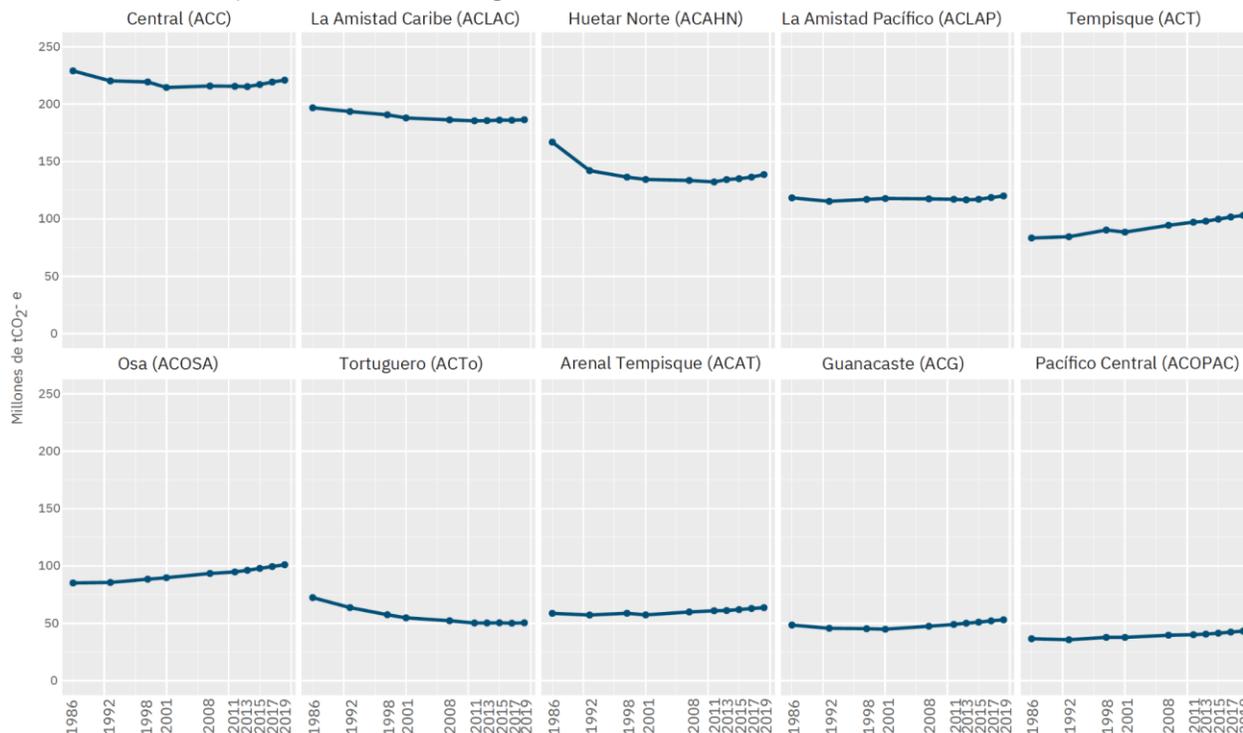
nacional, que al inicio de la serie presentaban los valores más elevados de densidad de carbono por hectárea (tonos azules en el primer mapa del mapa 1), pero al cierre de los últimos años analizados sufrieron pérdidas significativas (tonalidades amarillo y verde claro en el último mapa del mapa 1). Lamentablemente, los datos muestran que se trata de depósitos de carbono que no se han logrado recuperar con el paso del tiempo, y que al igual que en otros casos ya mencionados, evidencia la tendencia a la reducción de existencias de carbono en zonas cercanas a los límites de áreas protegidas, en este caso particular en los alrededores de los refugios de vida silvestre Maquenque y Barra del Colorado.

Por otro lado, también destacan los casos de las áreas de conservación Osa, Tempisque y Pacífico Central, que presentan un aumento en su stock de carbono (gráfico 2). Este incremento está asociado con tasas de crecimiento positivas a lo largo de casi todo el periodo, con valores promedio de crecimiento 1,9%, 2,4% y 1,9% respectivamente. Como resultado, estas áreas mostraron un aumento en sus depósitos que equivale en promedio al 20,2% con respecto al primer año analizado, es decir, el año 1986. Estos cambios positivos se pueden visualizar en los mapas, por ejemplo, en las penínsulas de Osa y Nicoya. Interesantemente, aunque en el caso de la ampliación de existencias de carbono en la península de Osa se puede relacionar con la existencia de áreas protegidas que cubren parte significativa de ese territorio, en el caso de la península de Nicoya se trata de un incremento que en su mayoría ocurre fuera de áreas protegidas.

Estas asimetrías territoriales en la evolución de los depósitos contribuyen a explicar el comportamiento temporal general del stock nacional de carbono, pues tuvo lugar un efecto de compensación, con el cual las pérdidas localizadas en regiones específicas fueron contrarrestadas por aumentos de sumideros en otras zonas. Estos resultados también evidencian la existencia de zonas que son más sensibles, se trata de áreas donde la reducción de la cobertura forestal, debido al tipo bosque que albergan (mayoritariamente primario) y su estrato, tiene un impacto mayor en términos de pérdida de depósitos forestales de carbono. Por ejemplo, la pérdida de sumideros de alta densidad de carbono en el norte del territorio nacional tuvo un peso importante en la reducción del stock nacional, principalmente al inicio de la serie. Estas son existencias que no se han logrado recuperar y, para hacerlo, probablemente se necesitarían cientos de años. En este caso, las estrategias de gestión forestal son esenciales, por un lado, para frenar la pérdida de existencias de carbono en la zona, pero también para el restablecimiento de estos recursos de manera que sea posible conservar y aprovechar este potencial de mitigación del cambio climático. Por otro lado, la acumulación de existencias en los últimos 30 años, localizadas en grandes extensiones que no necesariamente están dentro de áreas protegidas, como es el caso de la península de Nicoya, plantea una situación de riesgo por la vulnerabilidad asociada con bosques ubicados fuera de áreas protegidas.

Gráfico 2

Evolución de los depósitos de carbono según área de conservación. 1986-2019

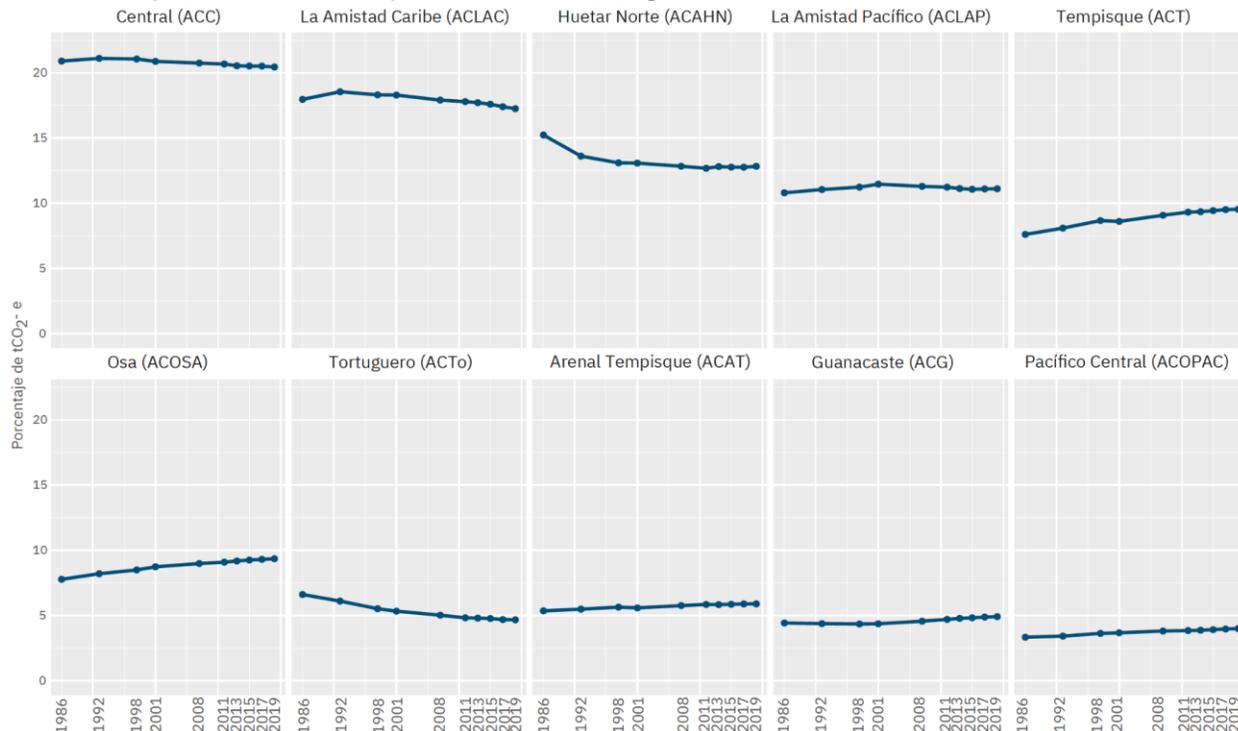


Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Por otro lado, si se analiza la participación porcentual de las distintas áreas a través del tiempo la mayoría han tenido un comportamiento relativamente estable (gráfico 3). Incluso las dos de más aporte, Central y La Amistad Caribe, que presentaron reducciones absolutas de los depósitos, registran un peso similar en el total nacional a través del tiempo. Pero en las áreas Huetar Norte y Tortuguero, las pérdidas absolutas sí se traducen en un menor aporte porcentual a los depósitos nacionales. La primera de estas pasó de aportar el 15,2% al 12,8% de los depósitos forestales de carbono, mientras que, en el caso del área de Tortuguero, esta pasó de aportar el 6,6% al 4,7% del stock nacional de carbono. El repunte de Osa y Tempisque también se refleja en términos relativos, estas fueron las dos zonas de mayor aumento en el peso a nivel nacional, de manera que alcanzaron valores de 9,4% y 9,5% respectivamente.

Gráfico 3

Distribución porcentual de los depósitos de carbono según área de conservación. 1986-2019



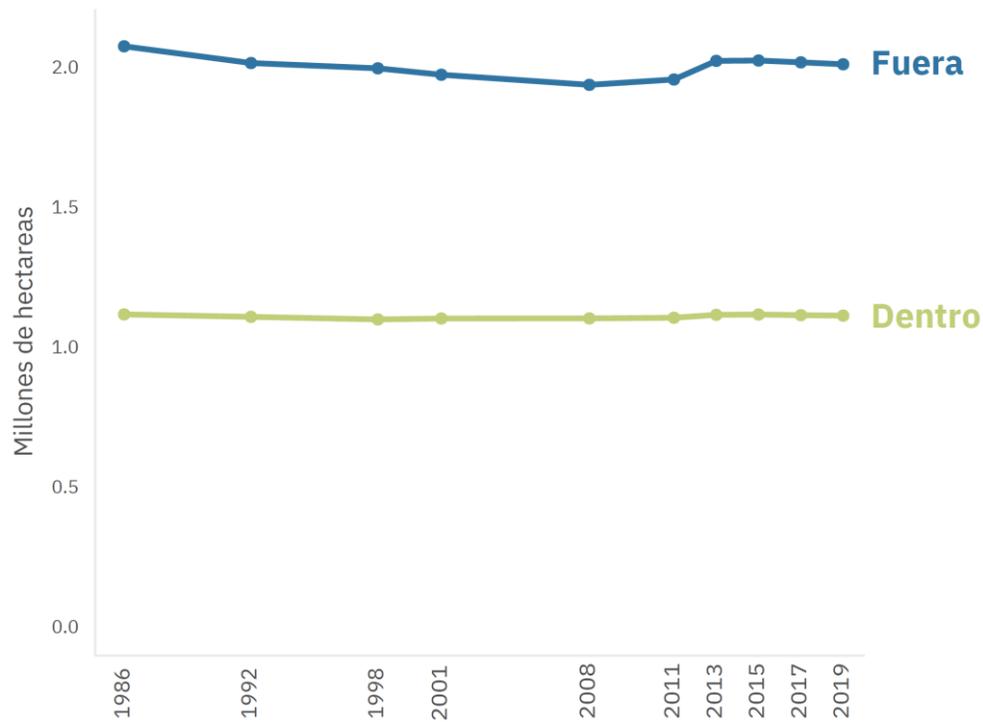
Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Finalmente, el análisis espacial de las existencias de carbono evidencia el papel relevante de las áreas protegidas. Aunque estas representan solo el 25,5% del territorio continental nacional, entre los años 1986 y 2019 aportaron en promedio el 35,6% de las hectáreas de bosque y el 40,7% de los depósitos de carbono (promedio de 428,9 millones de tCO<sub>2</sub>-e). Además, estas áreas muestran el comportamiento más estable en sus depósitos de carbono a lo largo del período analizado, tanto en la cantidad de bosques (línea verde en el gráfico 4), como en las existencias de carbono que almacenan (línea verde en el gráfico 5).

La concentración de esta proporción importante de depósitos forestales de carbono en áreas protegidas debe ser un tema de interés para efectos de las estrategias de resguardo de estos recursos. Si bien es cierto estas áreas cuentan con herramientas de protección y ordenamiento, pese a su estatus también enfrentan amenazas y están expuestas a presiones y riesgos. Algunos de los retos para la adecuada protección de estos recursos incluyen la poca información disponible para conocer el estado de los ecosistemas forestales dentro de áreas protegidas, así como el desarrollo de actividades productivas dentro de sus límites (tanto legales como ilegales), entre otros. Esto evidencia la necesidad de lograr mejoras en la capacidad institucional para el desarrollo de tareas de control y fiscalización, resguardar el estado y calidad de los bosques y consolidar los esfuerzos de protección.

Gráfico 4

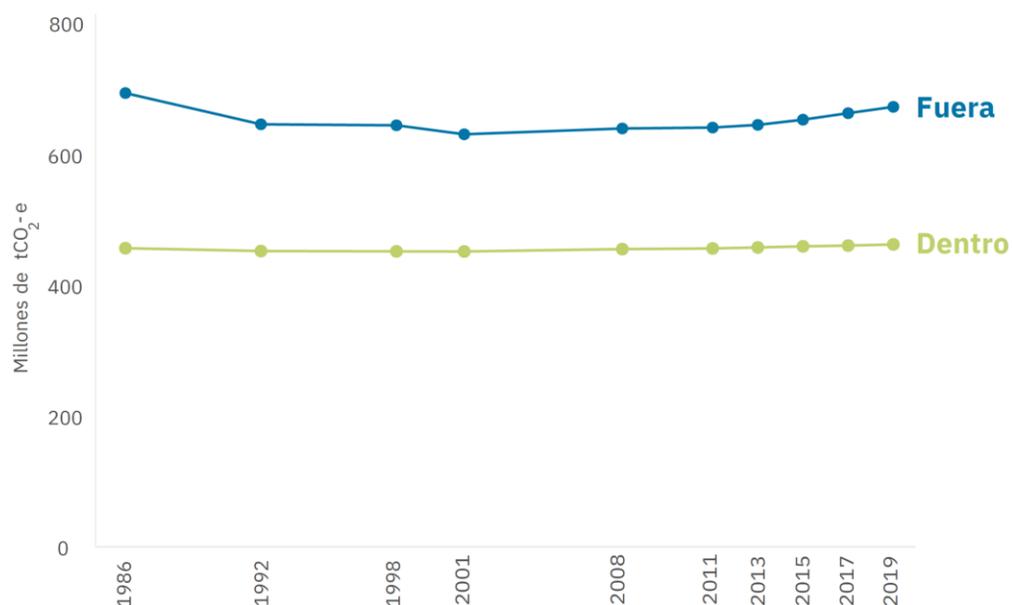
Evolución de las hectáreas de bosque según ubicación dentro o fuera de área protegida. 1986-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Gráfico 5

Evolución de los depósitos forestales de carbono según ubicación dentro o fuera de área protegida. 1986-2019



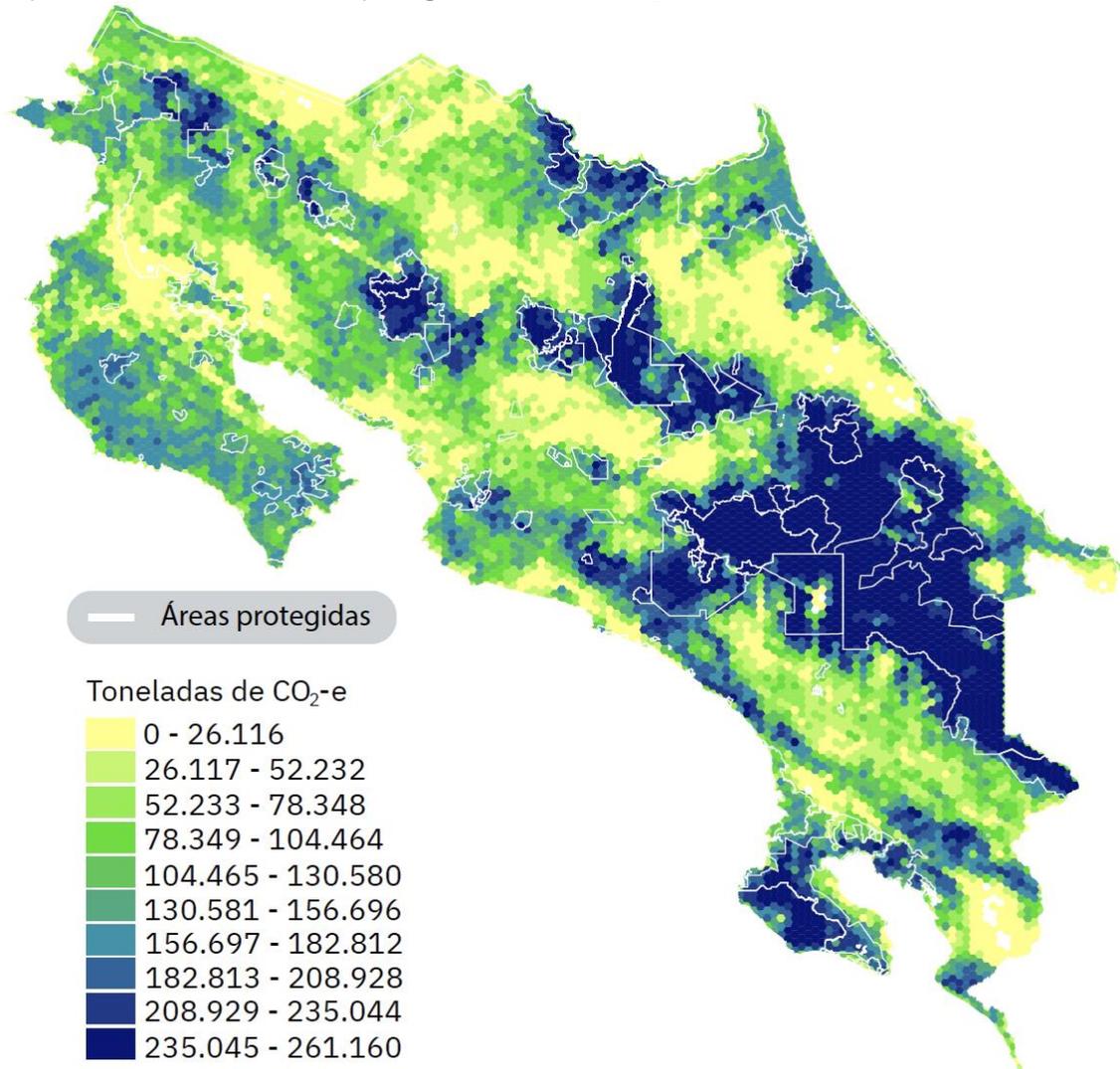
Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

El análisis muestra que los bosques fuera de áreas protegidas aportan la mayor parte del stock de carbono nacional con un promedio de 59,3% en el periodo 1986-2019. Aunque el área fuera de zonas protegidas corresponde al 74,5% del territorio continental del país, el aporte en términos de depósitos de carbono se relaciona con la cantidad de hectáreas de bosque que albergan, con un promedio de 64,4% de los bosques a nivel nacional. Fuera de áreas protegidas, tanto la cantidad de hectáreas de cobertura forestal (línea azul en el gráfico 4), como el nivel de existencias de carbono (línea azul en el gráfico 5), mostraron una tendencia comparativamente menos estable con respecto a lo ocurrido dentro de áreas protegidas. Se trata de un comportamiento que evidencia el nivel de estrés al que están sometidos estos bosques fuera de áreas protegidas, que se traduce en un comportamiento más fluctuante y en una reducción del stock al inicio de la serie.

Así, se puede observar que la recuperación de las existencias de carbono en la última década del análisis tuvo lugar fuera de áreas protegidas (gráfico 5). Un ejemplo de esto es lo ocurrido en la Península de Nicoya (mapa 2). Según se muestra en el gráfico 4, parte de este aumento se explica por un incremento en la cantidad de hectáreas de bosque secundario entre los años 2011 y 2013. Sin embargo, como se verá más adelante, el aumento de existencias de carbono por el crecimiento de bosques secundarios que se mantuvieron como bosques en los últimos años, también tuvo un aporte importante en la subida de los depósitos forestales de carbono. Adicionalmente, el análisis espacial de los depósitos evidencia una existencia importante de zonas de altas densidades de carbono (tonos azules) ubicadas fuera de zonas protegidas, por ejemplo, en la Cordillera de Talamanca y el Área de Conservación de Osa

## Mapa 2

Depósitos de carbono en áreas protegidas<sup>a/</sup>. 2019 ( $tCO_2 - e ha^{-1}$ )



<sup>a/</sup>Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Esta particularidad plantea una problemática asociada con la protección y gestión de esta gran proporción de recursos y sumideros que, por estar fuera de zonas de protección, presentan una mayor vulnerabilidad ante intervenciones antropogénicas. El patrón espacial de acumulación de existencias muestra que una parte importante de las ganancias del *stock* de carbono nacional de los últimos años ocurrió fuera de áreas protegidas o en su periferia, razón por la cual se hace más importante atender esta situación de riesgo. El análisis a fondo de este comportamiento es uno de los temas pendientes para trabajo futuro, de manera que sea posible, mediante métodos que incluyan trabajo de campo, identificar los factores que explican esta recuperación fuera de las áreas protegidas. Esta información es crucial para atender y reducir la vulnerabilidad existente.

Los patrones analizados en esta sección muestran la situación del *stock* nacional de carbono en cada momento de la serie histórica. Pero estas transiciones entre una cohorte y otra, es decir, los cambios en los depósitos de carbono a través del tiempo, se traducen en flujos de GEI hacia y desde la atmósfera. La siguiente sección profundiza en el análisis de estos flujos.

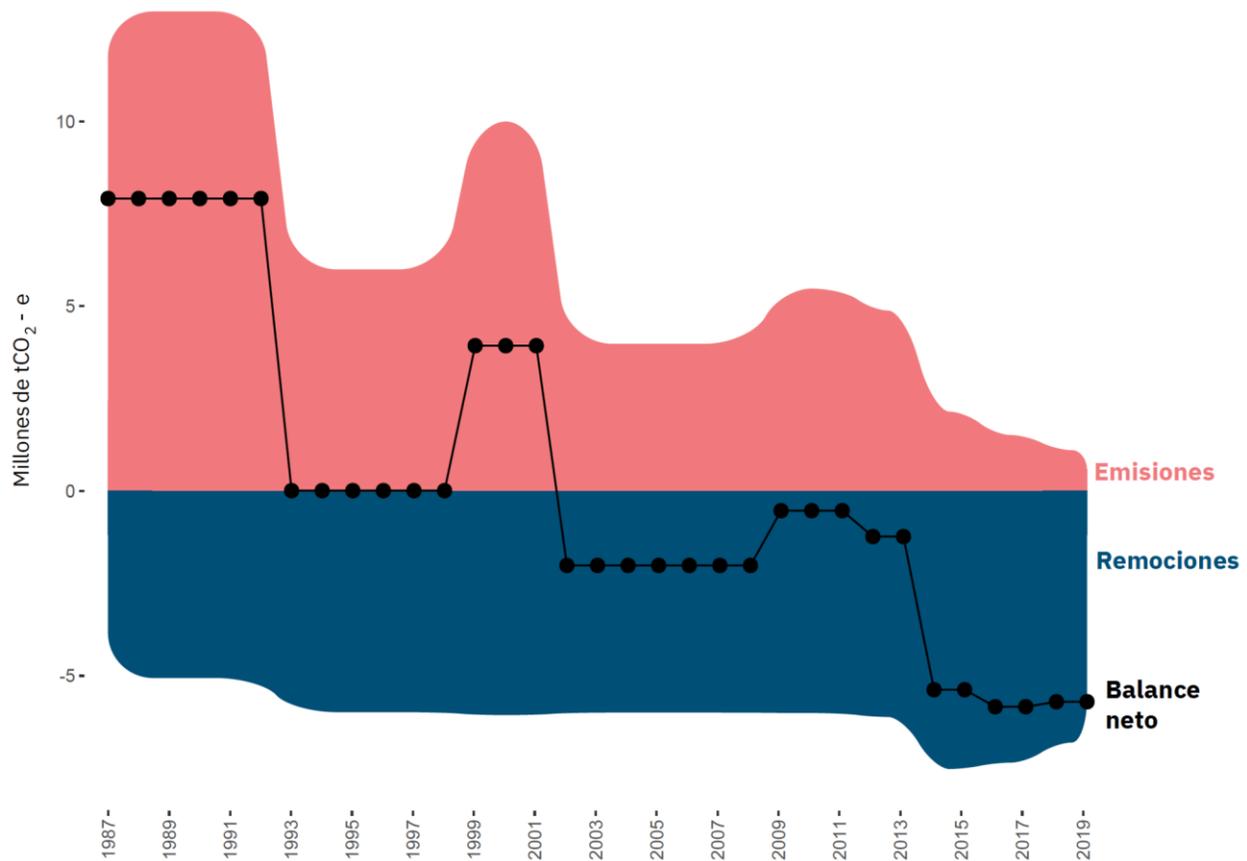
### **Emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal**

Los cambios en el uso del suelo, específicamente los que representan modificaciones en la cobertura forestal, se traducen en pérdidas y ganancias del *stock* nacional de carbono. El análisis de estas reducciones e incrementos de los depósitos forestales de carbono permite estimar las emisiones y remociones de CO<sub>2</sub> hacia y desde la atmósfera. Un aumento en las existencias de carbono se considera una remoción y una pérdida en los depósitos representa una emisión. El uso de la serie histórica de mapas de cobertura permite explorar espacial y temporalmente estos flujos según su asociación con usos del suelo vinculados a actividades humanas, para así aproximar los efectos antropogénicos sobre los depósitos de carbono y la creación de flujos de emisiones. Así, el análisis permite explorar los factores que determinaron los patrones identificados en la sección anterior.

El análisis muestra una reducción importante de las emisiones por deforestación, que pasaron de 13,0 millones de tCO<sub>2</sub>-e en 1986, el valor más alto registrado, a 1,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e en 2019, momento en que se alcanza el nivel mínimo (gráfico 6). Se pueden notar dos picos de emisiones durante los periodos 1987-1992 y 1999-2001, y uno de menor magnitud 2009-2011, que como se verá más adelante, están vinculados con intervenciones antropogénicas específicas. Por su parte, las remociones muestran un comportamiento más estable y con una tendencia hacia el alza a lo largo de la serie, con un promedio estimado de 6,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e durante los 34 años analizados. Como resultado, en el ámbito forestal el país ha tenido un balance positivo como sumidero de carbono (reservorio que acumula y almacena el carbono secuestrado) desde el año 2002 hasta el 2019. Así, el resultado en el balance se ha sustentado principalmente por la reducción de las emisiones y el mantenimiento de un nivel estable de remociones, es decir, no se han logrado aumentos significativos en los niveles de absorciones durante el periodo 1986-2019.

Gráfico 6

Evolución de las emisiones, remociones y balance neto. 1987-2019

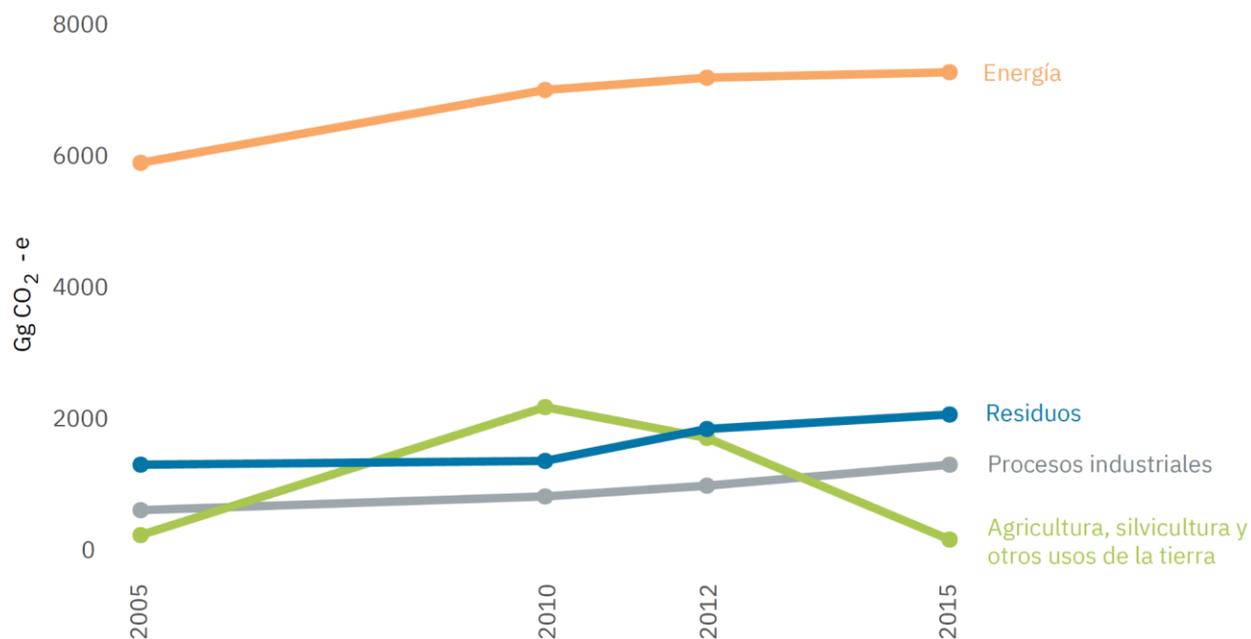


Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Este hallazgo evidencia una diferencia importante entre el sector forestal y el resto de sectores. Si se considera el balance reportado en el INGEI (IMN, 2019) para los cuatro sectores contemplados en dicho análisis, se puede notar que la mayoría aún está muy lejos de lograr un balance positivo (gráfico 7). De hecho, en los sectores energía, industria y manejo de residuos se observa un aumento de las emisiones a través del tiempo. Además, es importante considerar que incluso dentro del sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, los niveles bajos de emisiones se derivan del resultado positivo que ocurre exclusivamente en el sector forestal. Este tema es de gran relevancia en el contexto de las políticas nacionales de carbono neutralidad y descarbonización, pues el contraste entre los resultados de estos sectores en términos de emisiones, podría ser un reflejo de la disociación entre las políticas de reducción de emisiones del sector forestal y las políticas del resto de sectores.

Gráfico 7

Evolución de las emisiones de GEI según sector. 2005-2015



Fuente: Elaboración propia con datos INGEI (IMN, 2019).

El análisis de largo plazo evidencia que las emisiones no se han distribuido de manera homogénea en el territorio y que existe un patrón de concentración espacial de estas pérdidas de existencias de carbono registradas durante el periodo comprendido entre los años 1986 y 2019. El área conservación Huetar Norte presentó los niveles más altos y concentró el 26,6% de las emisiones. En segundo lugar, se ubica el área Central (15,7%), seguida por Tortuguero (10,0%) y La Amistad Pacífico (10,9%). El resto de áreas de conservación acumulan una menor proporción de emisiones, con valores que oscilan entre 8,3% en Tempisque y 4,0% en el Pacífico Central.

Desde una perspectiva espacial, es posible ver los cambios en la distribución de las emisiones y remociones en el territorio. El mapa 3 muestra las emisiones, remociones y balance neto al inicio y fin de la serie, momentos en que se alcanzan los valores extremos en ambos indicadores.

Entre los años 1987 y 1992, durante el pico histórico más alto de emisiones, se observa una afectación generalizada en el territorio nacional (mapa 3.A). Sin embargo, durante esos años la mayor parte de las emisiones se concentraron en el área de conservación Huetar Norte que emitió el 32,1% de estos gases para un total de 55,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e. En segundo lugar, se ubica al área Central donde se localizaron el 14,1% de las emisiones. El tercer lugar lo ocupó el área de Tortuguero, seguida por el resto de áreas con valores que oscilan entre 10,3% y 3,0%. En el año 2019, el patrón cambia, los niveles de emisiones son considerablemente menores y los valores altos se ubican principalmente en el Valle Central que acumuló el 25,7% de las emisiones.

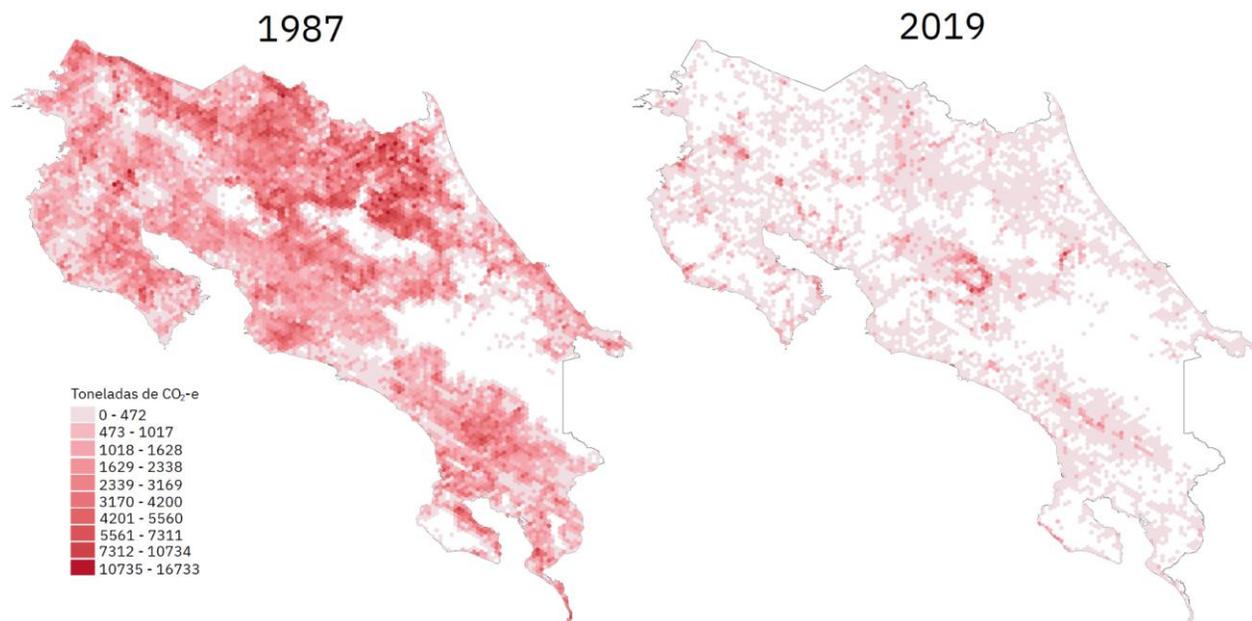
Por su parte, las remociones muestran un patrón de concentración claro entre los años 1987 y 1992, con valores altos en la Península de Nicoya, cordilleras de Guanacaste y Tilarán y la Península de Osa (mapa 3.B). Hacia el cierre del periodo analizado, en el año 2019, las absorciones se encuentran dispersas en todo el país. Como resultado de estos patrones espaciales se observa la transición desde un balance dominado por emisiones al inicio de la serie, hacia un resultado en favor de las remociones (mapa 3.C). Se puede notar que las áreas con aumentos más marcados de depósitos de carbono a lo largo del período analizado entre los años 1986 y 2019, es decir, Osa y Tempisque, fueron las que lograron un balance positivo en el momento más crítico de altos niveles de emisiones registrado entre los años 1987 y 1992.

### Mapa 3

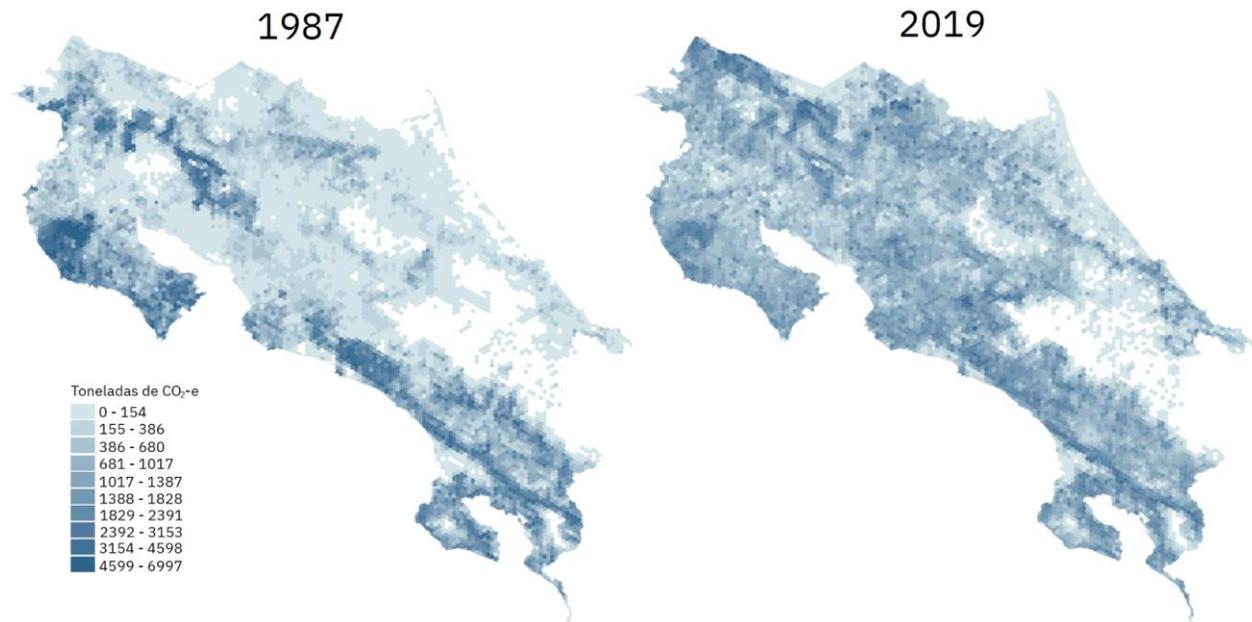
Emisiones por deforestación, remociones y balance neto<sup>af</sup>. 1987 y 2019

( $tCO_2 - e ha^{-1}$ )

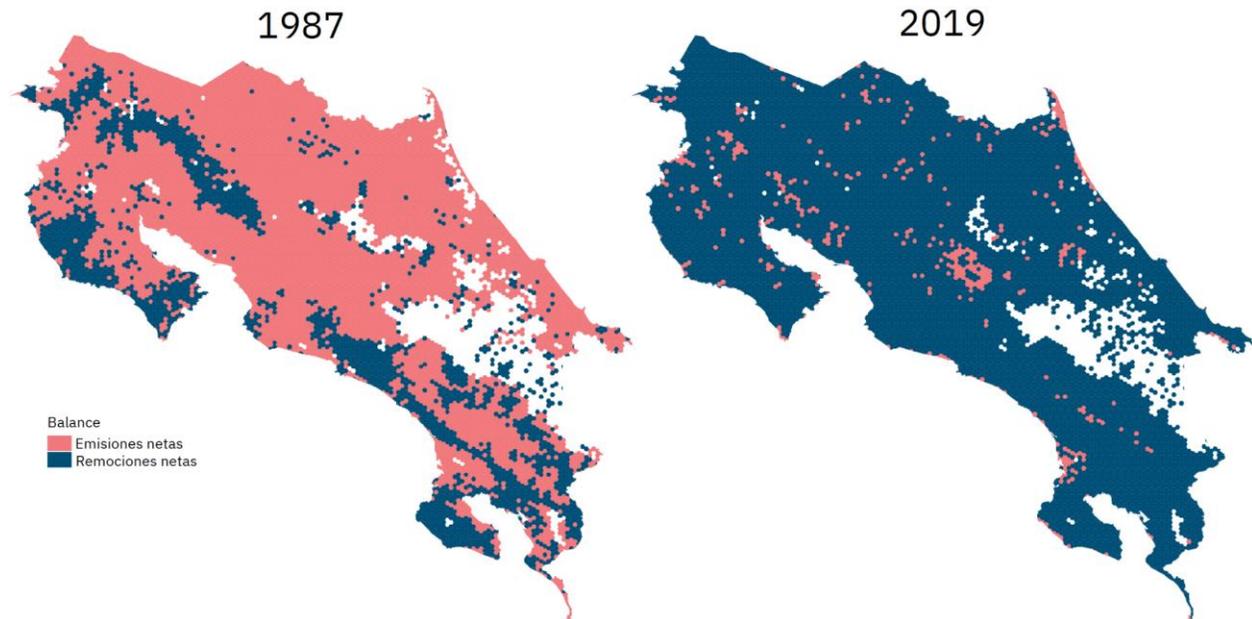
#### A) Emisiones



## B) Remociones



## C) Balance



<sup>a/</sup>Los resultados abarcan información analizada para distintos periodos, sin embargo, fue anualizada para efectos de comparabilidad entre un momento y otro. Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

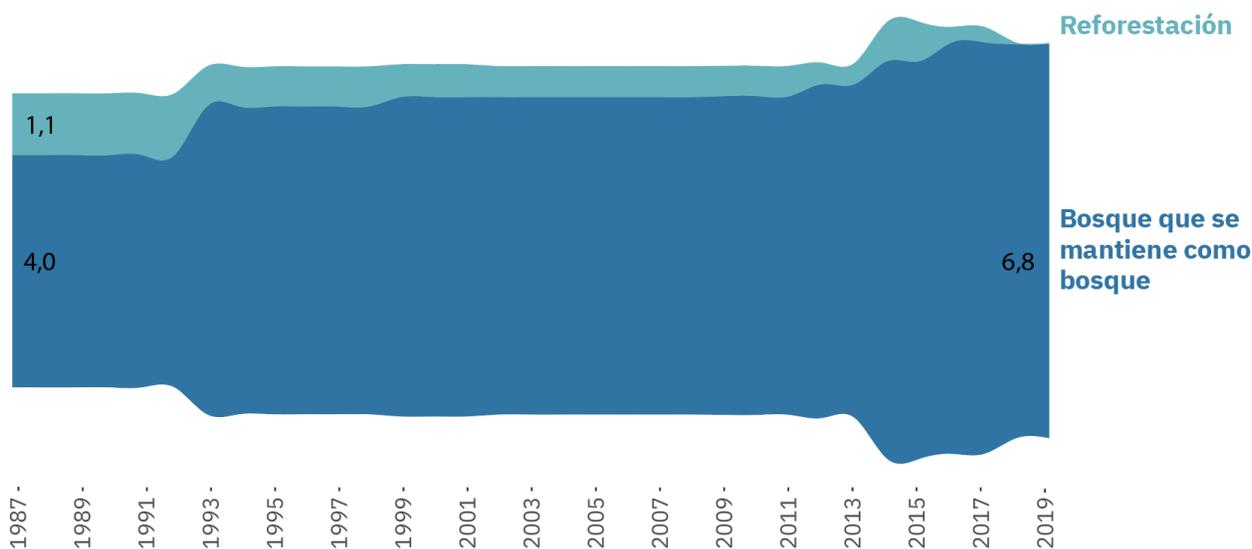
Este análisis de largo plazo que inicia en el año 1986 y finaliza en el año 2019, se puede dividir en tres grandes flujos. Por un lado, están las remociones por reforestación, es decir, las absorciones de CO<sub>2</sub> derivadas de la sustitución de otros usos por bosques que dan lugar a un aumento del *stock* de carbono, esto es, la aparición de nuevos bosques secundarios. En segunda instancia, están las remociones por bosques secundarios que se mantienen como bosques a través del tiempo, y como resultado de su crecimiento, se convierten en sumideros que captan CO<sub>2</sub> y aumentan gradualmente sus existencias de carbono. La tercera parte del flujo está compuesta por las emisiones generadas por la deforestación, en otras palabras, la sustitución de bosques por otros usos. Esta tercera parte del flujo a su vez se descompone según los usos asociados con esta pérdida de bosques. A continuación, se analiza el comportamiento temporal y espacial de estos flujos a partir de los datos disponibles. Cabe anotar que si bien estas tendencias, en el fondo, se relacionan con cambios en la estructura productiva del país y otros elementos como las políticas públicas implementadas a lo largo del periodo de estudio, el análisis a fondo de estos y otros factores escapa del alcance del trabajo y se plantea como un reto para futuras investigaciones.

El flujo de remociones ha estado compuesto principalmente por absorciones de bosques secundarios que se mantienen como bosques y aumentan sus existencias carbono (gráfico 8). El aporte de la reforestación en las remociones ha sido históricamente bajo y, salvo un leve repunte entre los años 2014 y 2015, ha perdido peso con el paso del tiempo pasando de 1,1 millones de tCO<sub>2</sub>-e en el año 1986 a un aporte mínimo de 0,02 millones de tCO<sub>2</sub>-e en el año 2019. De esta forma, el flujo de remociones pasó de estar compuesto por una combinación de reforestación (20,9%) y bosque que se mantiene como bosque (79,1%), a estar basada meramente en el crecimiento de existencias de carbono en bosques que se mantienen como tales y fueron recuperados en los últimos años, que para los últimos dos años aportó el 99,6% de las remociones. Así, es de suma relevancia destacar el rol de los bosques secundarios en la captura de CO<sub>2</sub>, pues el esfuerzo requerido para su protección es igual o incluso superior con respecto a los bosques primarios. Esto evidencia la necesidad de proteger estos bosques recuperados, pues el mantenimiento y consolidación de estos recursos es crucial para el mantenimiento de los niveles nacionales de remociones en el sector forestal.

Una mirada más detallada de los cambios, en uso de suelos responsables de los flujos de carbono asociados con la reforestación muestran que el mayor aporte proviene de la sustitución de pastizales por bosque (54,8%), seguido por cultivos (24,4%), sin embargo, como ya se mencionó, en términos generales el aporte de la reforestación en las remociones ha sido proporcionalmente bajo durante el periodo analizado.

Gráfico 8

Evolución de las remociones según flujo. 1987-2019 (Millones de  $tCO_2 - e$ )



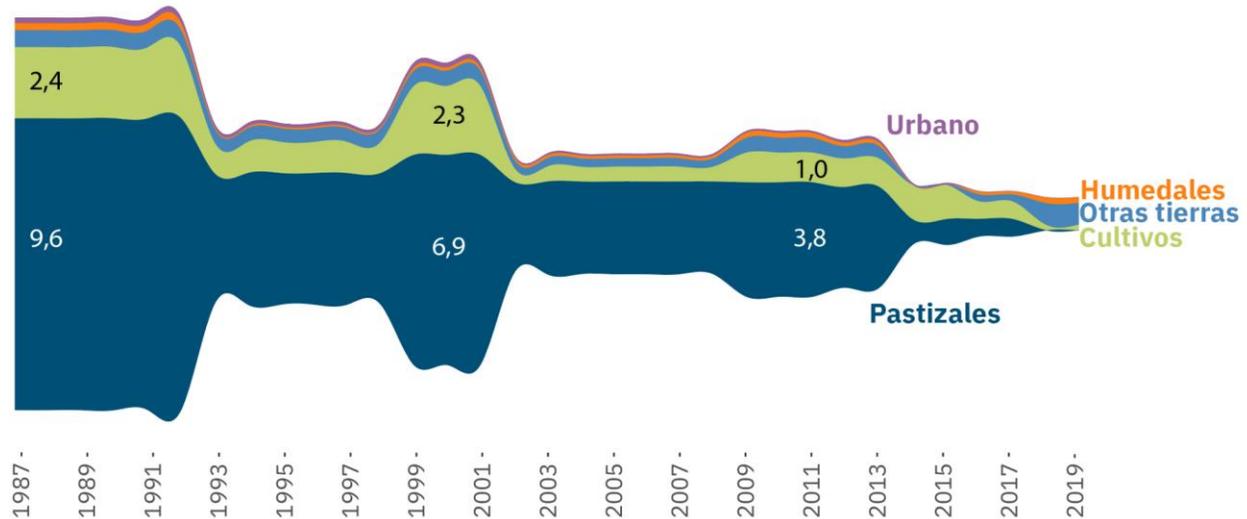
Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Desde el punto de vista de las emisiones es posible analizar el aporte que han tenido las perturbaciones de origen antropogénico en la deforestación y la pérdida de depósitos de carbono. La sustitución de bosques por pastos es la principal responsable de las emisiones por deforestación durante el periodo de análisis con un total de 146,9 millones de  $tCO_2 - e$  y un aporte del 70,9% (gráfico 9). En segundo lugar, con un peso significativamente menor, están los cultivos con un total de 39,5 millones de  $tCO_2 - e$  que equivalen al 19,1% de las emisiones totales. Las emisiones por la deforestación asociada directamente con la sustitución de bosques para el desarrollo urbano han sido mínimas (1,4% del total). Si se consideran otros usos, destaca el caso de la sustitución de bosques por otras tierras, que han mostrado un aumento en los últimos años e incluyen principalmente los cambios hacia suelos desnudos.

Según se observa en el gráfico 9, se identifican tres picos de emisiones que están vinculados con aumentos importantes de las emisiones por conversión de bosques a pastizales y en menor medida cultivos. El 43,3% de las emisiones asociadas con la deforestación asociada a pastizales ocurrieron durante esos picos para un total de 89,7 millones de  $tCO_2 - e$ . A partir del año 2014 se nota una marcada disminución de las emisiones vinculadas con este uso que apenas representó el 1,2% en los últimos dos años analizados.

Gráfico 9

Evolución de las emisiones según flujo. 1987-2019 (Millones de  $tCO_2 - e$ )



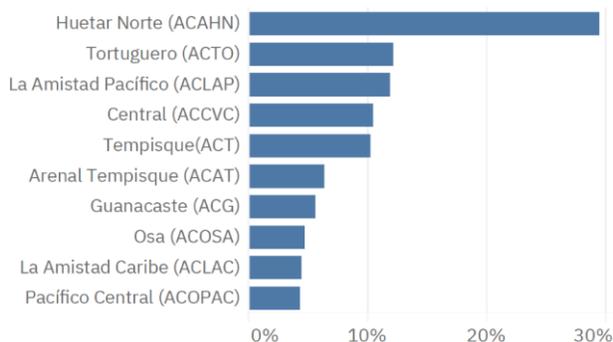
Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Las emisiones derivadas de la pérdida de bosques por sustitución hacia pastos, generadas durante los 34 años analizados en el periodo 1986-2019, se concentraron mayoritariamente en el área Huetar Norte (29,5%). Las áreas de Tortuguero, La Amistad Pacífico, Central y Tempisque presentan una afectación relativamente menor pero también considerable, con valores de concentración de emisiones que van desde 12,2% a 10,3% (gráfico 10.A). En el caso de las emisiones por deforestación asociada con cultivos (gráfico 10.B), el mayor aporte tuvo lugar en la región Central (29,0%), seguida muy de cerca por la Huetar Norte (26,1%). Un segundo grupo de áreas, que incluyen La Amistad Caribe, Tortuguero y La Amistad Pacífico, también tuvieron un aporte significativo, que en conjunto representa el 31,5% de estas emisiones.

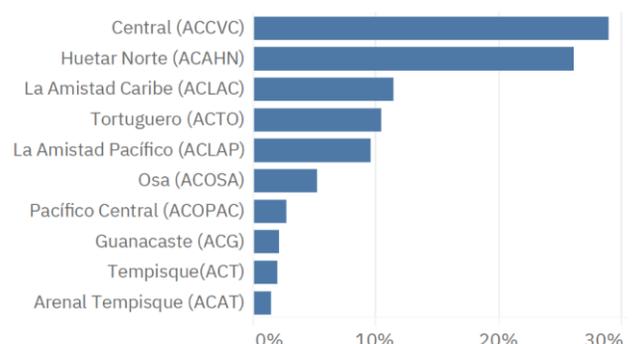
Gráfico 10

Emisiones por deforestación según fuente. 1987-2019 (Porcentaje)

A) Deforestación asociada con pastos



B) Deforestación asociada con cultivos



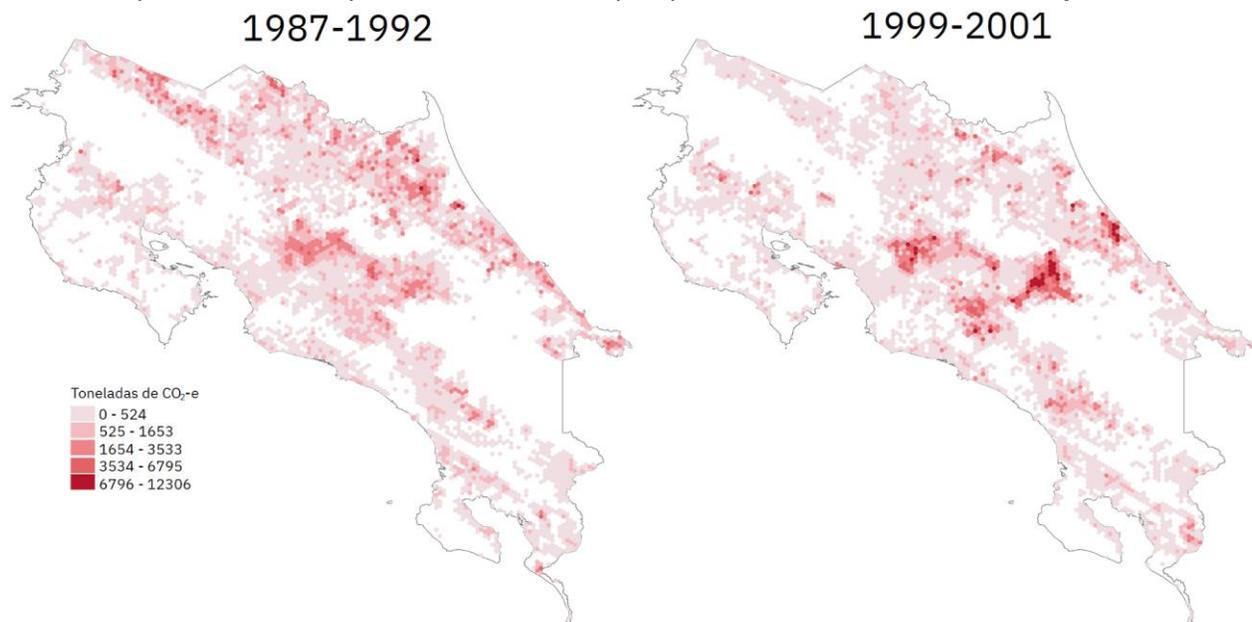
Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

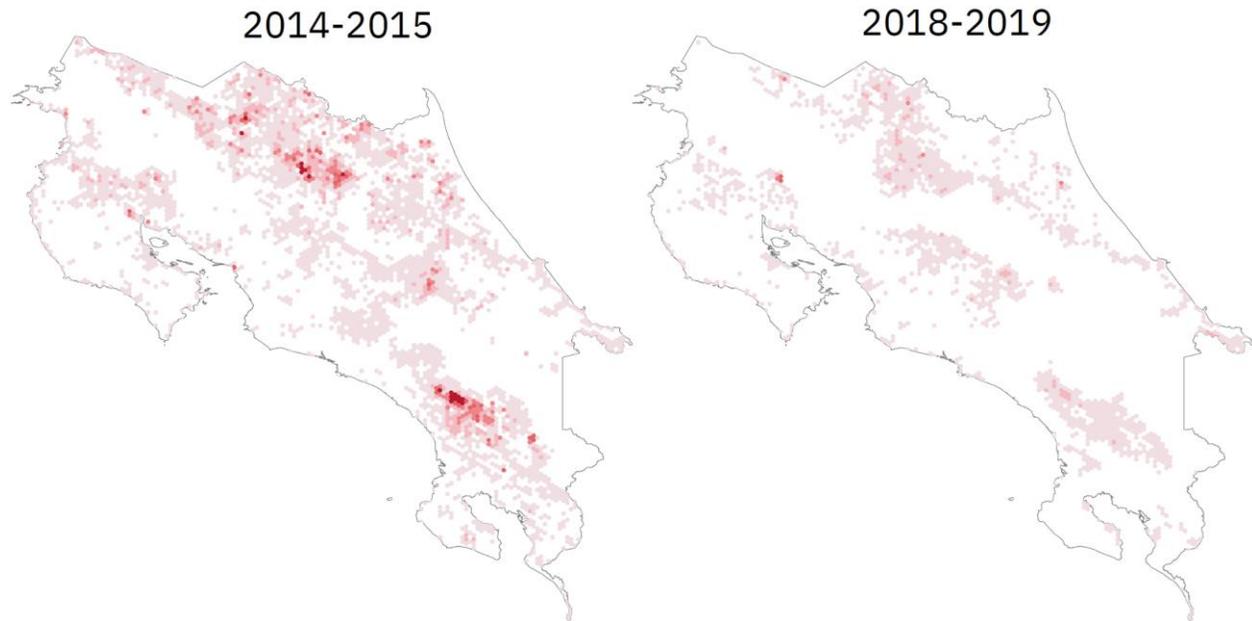
Con el objetivo de analizar los cambios en los patrones espaciales de las emisiones por deforestación asociadas con la agricultura y la ganadería, se lleva a cabo un análisis de la distribución de las emisiones en el territorio durante los picos más relevantes de emisiones en cada caso. Como resultado se observan patrones espaciales distintos entre ambas fuentes.

En el caso de las actividades agrícolas las emisiones del primer pico, ocurridas entre los años 1987 y 1992 (mapa 4), se concentraron en las áreas Huetar Norte (28,8%), Central (27,7%) y Tortuguero (14,0%). En el segundo momento de alta intensidad, entre los años 1999 y 2001, se observan cuatro focos de concentración de valores altos de emisiones asociadas con el agro. Tres de estos se ubican dentro del área de conservación Central, que acumuló el 41,1% de las emisiones en esos años, específicamente en los sectores de Turrialba y Jiménez; Occidente del Valle Central; y las zonas de Aserrí, Tarrazú y Dota. También se identifica un cuarto foco en el área La Amistad Caribe, particularmente en los cantones de Matina y Siquirres. El tercer pico tuvo lugar entre los años 2014 y 2015, donde los niveles más altos de emisiones se ubicaron en las áreas Huetar Norte (47,1%) y La Amistad Pacífico (28,7%).

#### Mapa 4

Emisiones por deforestación por sustitución de bosques por cultivos/a/. 1987, 1998, 2008 y 2019





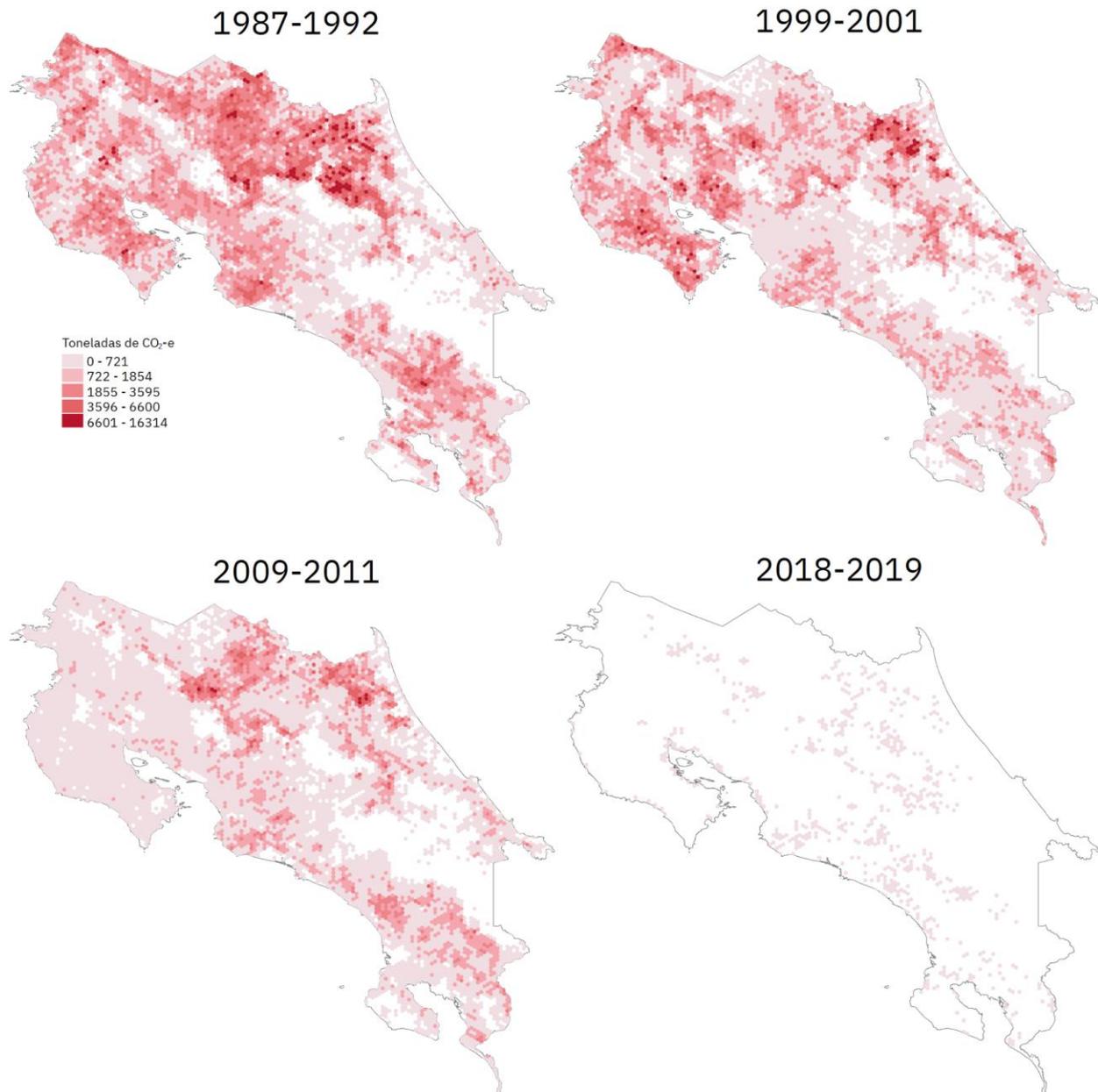
<sup>a/</sup>Los resultados abarcan información analizada para distintos periodos, sin embargo, fue anualizada para efectos de comparabilidad entre un momento y otro. Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

En el caso de la sustitución de bosques por pastos, durante el primer pico (1986-1992) las emisiones tuvieron un alto grado de concentración en el área Huetar Norte con un aporte de 35,6% de las emisiones nacionales en ese periodo, mientras en el resto de áreas el aporte no superó el 10,8% (mapa 5). Durante el segundo pico, ocurrido entre los años 1999 y 2001, el área Huetar Norte continuó como responsable de la mayor parte de las emisiones (20,4%), pero el área Tempisque, específicamente en el golfo de Nicoya, aumentó sus emisiones y aportó el 19,4% de estos gases. Durante el último pico y el resto de la serie histórica el área Huetar Norte mantuvo el protagonismo en las emisiones.

### Mapa 5

Emisiones por deforestación por sustitución de bosques por pastizales<sup>a/</sup>. 1986, x, y, y 2019



<sup>a/</sup>Los resultados abarcan información analizada para distintos periodos, sin embargo, fue anualizada para efectos de comparabilidad entre un momento y otro. Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae, 2019b.

Los resultados del análisis espacial y temporal de las emisiones según estos dos usos del suelo, evidencian el nivel de estrés al que han estado sometidos los bosques, y, por ende, los depósitos de carbono, durante los 34 años comprendidos en el análisis. Estos patrones identificados demuestran cómo algunas zonas del país han estado expuestas a múltiples perturbaciones antropogénicas que han tenido impactos importantes en su potencial de mitigación del cambio

climático. Por ejemplo, las áreas de conservación Huetar Norte y Tortuguero, que sufrieron pérdidas de sumideros de altos niveles de densidad de carbono entre los años 1986 y 2019, se vieron afectadas por momentos de una intensidad considerable de emisiones asociadas tanto con el agro, como con la actividad ganadera.

### **Escenario de depósitos de carbono ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas**

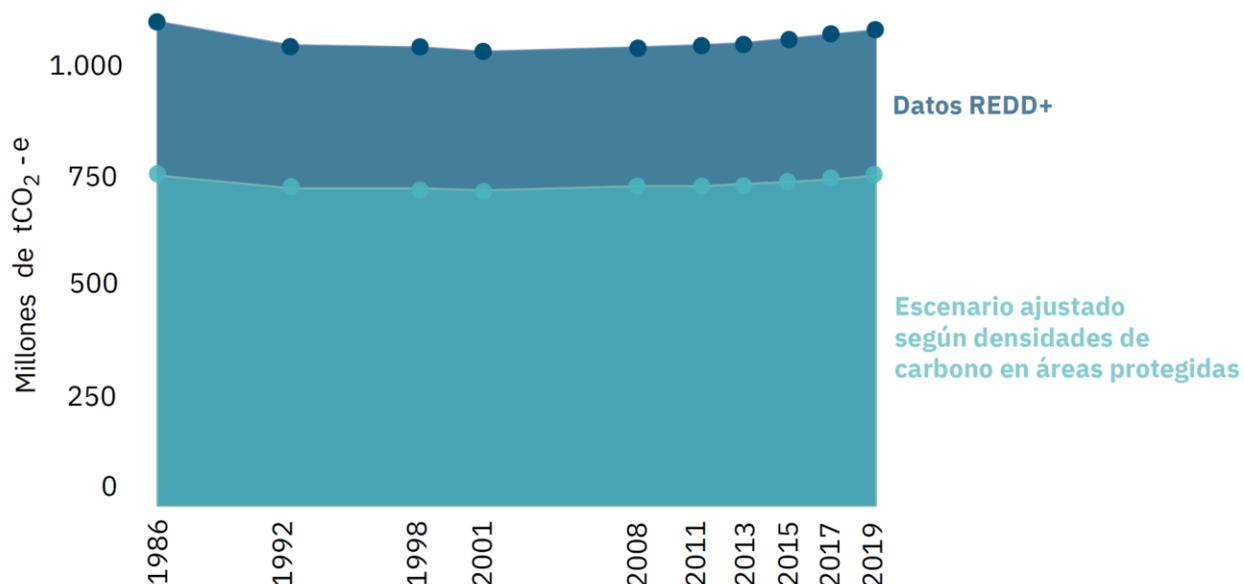
Un estudio aún en desarrollo por parte de investigadores de REDD+ Costa Rica y el Catie (Obando et al., 2021) ha analizado las existencias de biomasa de los bosques del país mediante datos del INF. Dicho trabajo ha evidenciado las diferencias en las existencias de carbono de los bosques ubicados dentro de áreas protegidas con respecto a los ubicados fuera de estas áreas. Así, uno de los hallazgos principales de dichos análisis es que las existencias de carbono en los bosques ubicados dentro de áreas protegidas se duplican en bosques secundarios y son más del doble en primarios, en comparación con los ubicados fuera de áreas protegidas.

En línea con estos hallazgos que surgieron durante el desarrollo de la presente investigación, y dado que los datos oficiales de REDD+ no contemplan estas diferencias, en esta sección se lleva a cabo un ejercicio exploratorio de estimación de los depósitos de carbono a nivel nacional, bajo un escenario en el cual se ajustan las existencias de carbono de los bosques del país según las diferencias en la biomasa reportadas por Obando et al. (2021). Estas diferencias están dadas por la ubicación de los bosques dentro o fuera de áreas protegidas. Este ejercicio pretende explorar las tendencias temporales y espaciales del stock nacional de carbono a la luz de estos nuevos resultados preliminares, como un enfoque complementario que brinde una perspectiva distinta y que sea un punto de partida para obtener resultados más precisos, pues considera en el análisis información que hasta el momento no había sido contemplada, para así lograr una reducción de la incertidumbre en las estimaciones. Aunque a la fecha de realización de esta ponencia el estudio de Obando et al. (2021) aún no ha sido publicado, este ejercicio exploratorio pretende brindar nueva información que pueda servir de insumo para el desarrollo de políticas públicas. Aun así, es importante aclarar que estos resultados son de carácter exploratorio y preliminar, y se requieren a futuro análisis más profundos en esta materia.

Bajo este escenario ajustado las existencias de carbono a nivel nacional son considerablemente menores si se comparan con los sumideros estimados con los datos del nivel de referencia REDD+ (gráfico 11). La estimación del *stock* nacional de carbono desciende a un promedio de 731,6 millones de tCO<sub>2</sub>-e durante el período 1986-2019, esto equivale a una diferencia de 322,9 millones de tCO<sub>2</sub>-e con respecto a las estimaciones realizadas en la primera sección de este trabajo con los datos de REDD+, esto es una reducción del 30,6%. Por su parte, el comportamiento temporal de la evolución de los depósitos con este ajuste presenta un patrón similar a los resultados del escenario analizado en las secciones anteriores del trabajo, es decir, un comportamiento de relativa estabilidad con un repunte hacia el final de la serie analizada.

Gráfico 11

Evolución de los depósitos de carbono según datos de REDD+ y escenario ajustado por densidades de carbono en áreas protegidas. 1986-2019

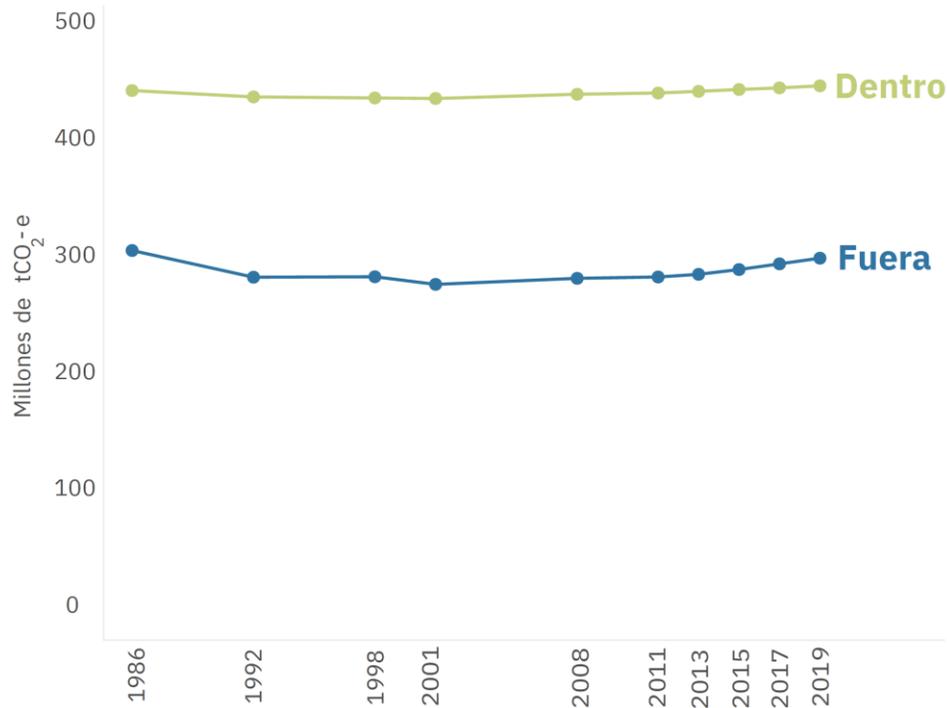


Fuente: Elaboración propia con datos de Minae (2019b) y Obando et al. (2021).

Además de la magnitud, una segunda diferencia con respecto a las estimaciones realizadas previamente en la presente investigación, es el aporte de los bosques ubicados dentro de áreas protegidas a lo largo del periodo analizado. Las estimaciones de este escenario muestran que estos bosques aportaron en promedio 442,2 millones de tCO<sub>2</sub>-e que corresponde al 60,5% del *stock* nacional de carbono (gráfico 12). Esto significa una diferencia de 19,8 puntos porcentuales si se contrasta con los valores estimados con los datos de REDD+. En otras palabras, en este escenario el patrón de concentración espacial dentro de áreas protegidas es mayor, pues, aunque estas representan apenas el 25,5% de la superficie terrestre nacional, estarían aportando el 60,5% de las existencias. Los resultados también evidencian la estabilidad de los depósitos de carbono a lo interno de las áreas protegidas, que mostraron tasas de crecimiento iguales o menores al 1% a lo largo del periodo 1986-2019. Fuera de estas áreas se observa un comportamiento más fluctuante, por ejemplo, tasas de crecimiento que alcanzaron el -7,5% entre los primeros años analizados.

Gráfico 12

Evolución de los depósitos de carbono según ubicación dentro o fuera de área protegida en escenario ajustado. 1986-2019

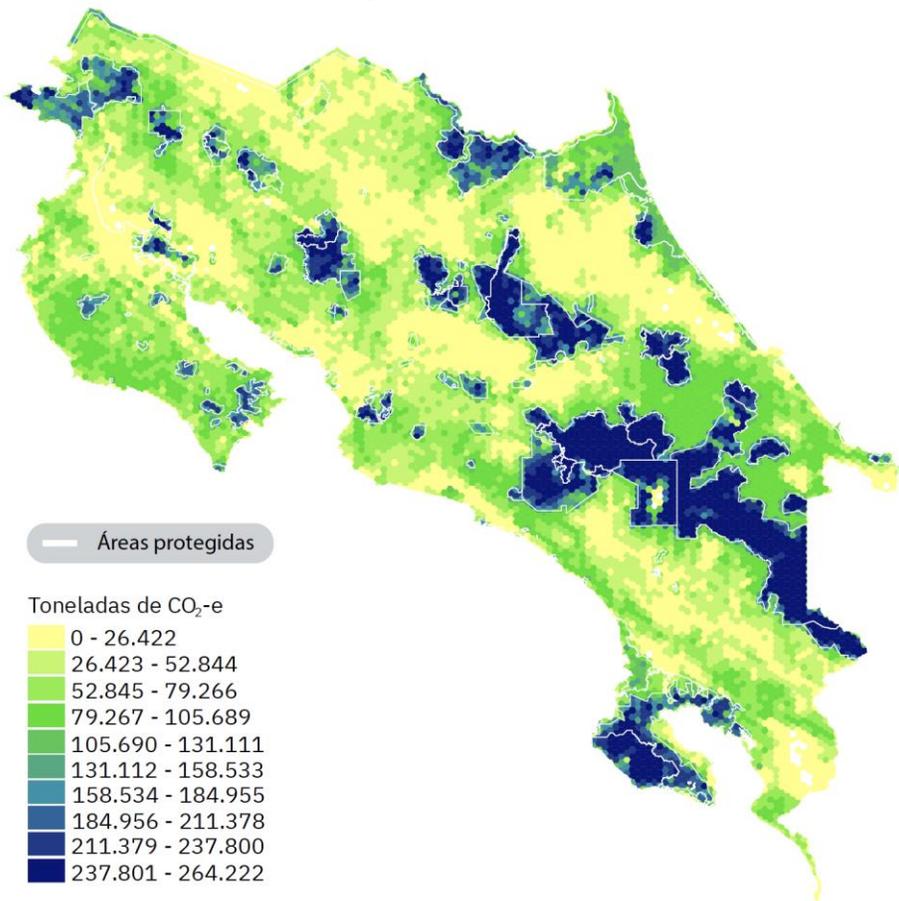


Fuente: Elaboración propia con datos de Minae (2019b) y Obando et al. (2021).

El aumento en los niveles de concentración espacial es muy visible desde la perspectiva geográfica, debido a que en este escenario los valores altos de depósitos de carbono se circunscriben exclusivamente dentro de los límites de áreas protegidas (tonalidades azules en el mapa 6). Por este motivo, la ubicación de áreas protegidas de gran extensión dentro de los límites de las áreas de conservación Central y La Amistad Caribe las posicionan como las de mayor aporte en el *stock* nacional de carbono con un peso conjunto de 40,5%.

### Mapa 6

Depósitos de carbono en áreas protegidas en escenario ajustado<sup>a/</sup>. 2019 ( $tCO_2 - e ha^{-1}$ )



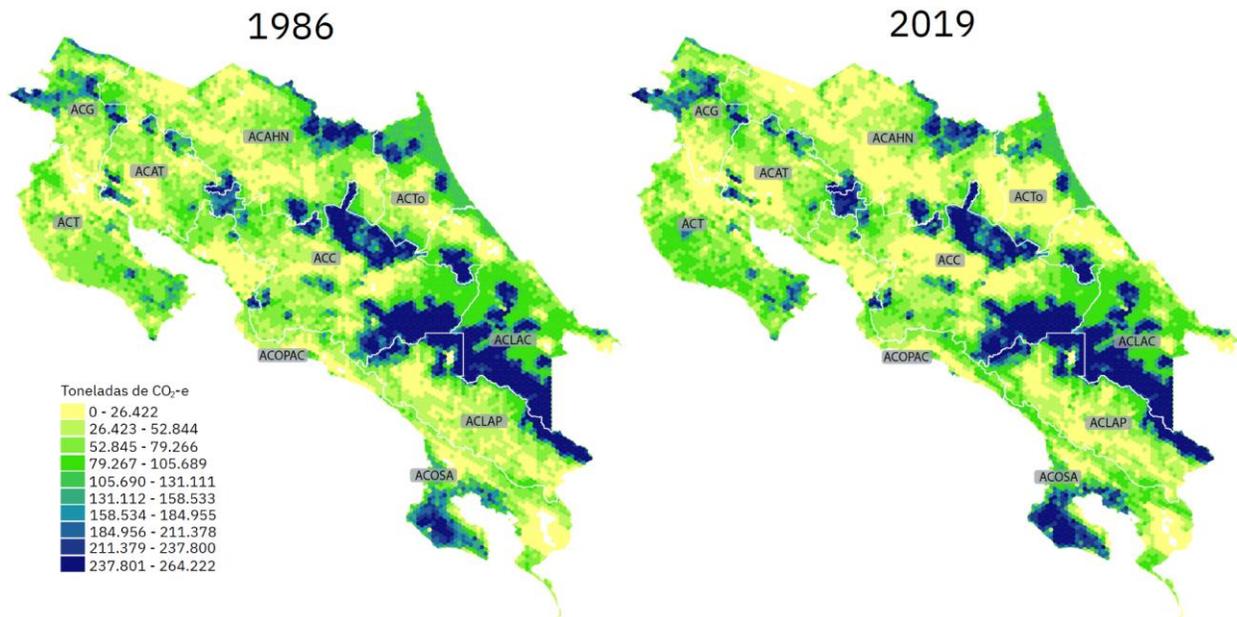
<sup>a/</sup>Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae (2019b) y Obando et al. (2021).

La comparación de la ubicación y nivel de depósitos entre los años 1986 y 2019, también evidencia la pérdida de existencias en zonas de alta densidad de carbono por hectárea en el área de conservación Tortuguero, esto se refleja en una tasa de crecimiento promedio negativa del *stock* de carbono de dicha área de un -3,2%, que en los primeros años de la serie alcanzó su valor más elevado de -10,1%. También se observa una reducción de existencias en sectores caracterizados por menores densidades de carbono (transición de tonos amarillos a verdes en el mapa 7) como son los casos del Valle Central, el área de conservación Huetar Norte y el sector sur de Tortuguero. La recuperación de depósitos forestales de carbono en las penínsulas de Nicoya y Osa también se refleja en este escenario, como resultado las áreas de conservación de Osa y Tempisque aumentaron su aporte en los depósitos de carbono de 7,8% y 7,6% a valores de 9,4% y 9,5% respectivamente.

## Mapa 7

Depósitos de carbono en escenario ajustado según área de conservación<sup>a/</sup>. 1986 y 2019 ( $tCO_2 - e ha^{-1}$ )



<sup>a/</sup>Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, donde cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Elaboración propia con datos de Minae (2019b) y Obando et al. (2021).

Este ejercicio exploratorio da luces sobre una realidad distinta en el *stock* nacional de carbono si se consideran las diferencias en las densidades de carbono de bosques ubicados dentro de áreas protegidas con respecto a los ubicados fuera de estas áreas. Además, plantea la necesidad de profundizar aún más en estas diferencias y sus implicaciones en términos analíticos, para lograr, a futuro, resultados que puedan ser más precisos y ajustados a la realidad de los territorios. Esta es parte de la discusión que se espera generar a partir de esta investigación.

## Conclusiones y trabajo futuro

### Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran que los depósitos de carbono presentan un patrón de relativa estabilidad a lo largo de la serie histórica analizada entre los años 1986 y 2019. Sin embargo, una mirada más detallada evidencia que este comportamiento es el resultado de una serie de pérdidas y ganancias en el *stock* de carbono que han ocurrido a través del tiempo y que se han distribuido de manera desigual en el territorio. Como resultado de esta asimetría, se identifican áreas del país con un deterioro de sus existencias forestales de carbono, y, por tanto, de su potencial forestal de mitigación de cambio climático, mientras que otras regiones han logrado incrementar su *stock*. Estas pérdidas y ganancias no solo se derivan de cambios en la cobertura boscosa nacional que tiene implicaciones sobre los ecosistemas forestales del país,

además se trata de recursos perdidos que en algunos casos tomará mucho tiempo recuperar, e incluso los que se han recuperado no están libres de riesgos.

Se identifican fluctuaciones a través del tiempo marcadas por una pérdida de existencias al inicio de la serie histórica. A pesar de la recuperación en los depósitos, que se ha acelerado en los últimos años, el país aún no alcanza el nivel del stock de carbono de los años ochenta. Los resultados también muestran que este potencial de mitigación presenta un importante patrón de concentración espacial, por cuanto algunas zonas del territorio nacional concentran proporciones importantes del stock nacional de carbono, tal es el caso de las áreas de conservación Central y La Amistad Caribe que acumulan respectivamente el 20,7% y 17,9% del stock nacional de carbono. Este patrón espacial, caracterizado por una distribución asimétrica del potencial forestal de mitigación del cambio climático en el territorio, implica que zonas específicas del país presentan un potencial limitado y, además, genera dependencia de otras zonas que concentran parte importante de los depósitos de carbono. Esto evidencia la relevancia de lograr una distribución más equitativa del stock nacional de carbono.

El análisis histórico de los patrones espaciales y temporales de las emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal, demuestra el impacto que han tenido las actividades humanas en los territorios. Las áreas identificadas como ganadoras y perdedoras de depósitos, se han determinado en gran parte por las perturbaciones antropogénicas registradas a través del tiempo. Así, las apuestas productivas localizadas en distintas zonas del país ocasionan cambios en la configuración del uso del suelo que impactan directamente el potencial de mitigación del cambio climático de los territorios y el país.

Si bien es cierto, el balance neto reciente en el ámbito forestal (entre emisiones por deforestación y remociones por reforestación o aumento de existencias de carbono) es positivo, detrás de este resultado existen pérdidas y ganancias de depósitos de carbono, que, al no estar distribuidas de manera equitativa en el territorio, también se traducen en una concentración de emisiones y remociones en áreas específicas. Tal es el caso de las áreas de conservación Huetar Norte y Central, que de manera conjunta acumulan el 42,3% de las emisiones por deforestación de los 34 años analizados durante el periodo 1986-2019. Otras áreas como Tortuguero y La Amistad Pacífico también acumulan proporciones importantes de estas emisiones, con valores de 10,0% y 10,9% respectivamente. También se identifican algunas áreas de menor afectación, por ejemplo, el Pacífico Central apenas acumuló el 4,0% de las emisiones a lo largo del periodo.

Los picos históricos de emisiones por deforestación se han relacionado con una demanda de tierras de sectores como la ganadería y el agro, que como resultado derivan en una sustitución de bosques por otros usos como pastos y cultivos. Una de las interrogantes que quedan luego del análisis, es si esta reducción en las emisiones responde a una dinámica estructural y sostenible; o si, por el contrario, es más de carácter coyuntural, y ante futuros cambios o demandas de los sistemas productivos se podrían presentar nuevos picos de emisiones que se materialicen en un retroceso de los depósitos que se han recuperado en los últimos años. Es importante considerar que, dado que el balance positivo del país en el ámbito forestal está basado en la reducción de emisiones y la estabilidad de las remociones, es decir, no ha existido un incremento del stock de carbono y las remociones, puede que, según el nivel de futuros picos, las remociones no alcancen para lograr un balance positivo en el sector. Así, ante el riesgo de

futuras presiones antropogénicas que se traduzcan en una reducción de los depósitos forestales de carbono, la sostenibilidad de este resultado positivo del sector, que se ha mantenido desde la década del año 2000, debe ser parte de las metas del país.

El análisis de la composición del flujo de remociones evidencia la relevancia de los bosques secundarios que se mantienen como bosques y aumentan sus existencias carbono, que para los últimos dos años aportaron la mayor proporción de las remociones. Este es un tema que requiere especial atención. Por un lado, evidencia la necesidad de proteger estos bosques recuperados, que son el resultado de un esfuerzo igual o superior al que requieren los bosques primarios para su conservación. El mantenimiento y consolidación de estos recursos es crucial para el mantenimiento de los niveles nacionales de remociones en el sector forestal. Pero, además, debido al patrón temporal observado de aumento del peso de los bosques secundarios en las remociones, se deben llevar a cabo esfuerzos importantes para visibilizar el papel de estos bosques de manera que sean considerados en los nuevos estándares de pagos por resultados en programas a nivel internacional.

Por otro lado, los hallazgos muestran que una proporción importante de la recuperación de depósitos forestales de carbono en los últimos años se ha localizado fuera de las áreas protegidas, lo que representa un riesgo que se podría materializar si el sistema producción presiona para la conversión de estas tierras forestales, que están en condiciones más vulnerables, hacia otros usos. Este es un tema central, pues los resultados del periodo analizado muestran que las mayores fluctuaciones en los depósitos ocurren fuera de zonas protegidas, donde se ubica la mayor proporción del stock nacional de carbono.

La experiencia histórica analizada en este trabajo demuestra como la obtención de un balance neto positivo durante picos de emisiones ocasionados por las actividades humanas, es crucial para la estabilidad de los depósitos forestales de carbono y el potencial de mitigación del cambio climático. Por ejemplo, los casos de las áreas de conservación de Osa y Tempisque, que lograron mantener un balance neto positivo durante los máximos niveles de estrés derivados de las presiones antropogénicas. Incluso en el caso del área de conservación Tempisque, que concentró el 19,4% de las emisiones durante el segundo pico de emisiones vinculado con la actividad ganadera, logró mantener un balance positivo y aumentar sus existencias de carbono, como producto del incremento sostenido de sus existencias de carbono a lo largo de la serie. En algunas zonas del país lograr esto puede representar un gran reto, sobre todo si se considera que algunos territorios reciben presiones de varios sectores de manera simultánea, como en el caso de la región Huetar Norte, que ha sufrido importantes pérdidas de existencias de carbono por la deforestación vinculada hacia presiones del agro y la ganadería.

El ejercicio exploratorio bajo un escenario de densidades de carbono ajustadas según la ubicación de bosques dentro de áreas protegidas, da luces sobre una realidad distinta en el stock nacional de carbono si se consideran estas diferencias. Bajo este escenario, los niveles estimados de los depósitos de carbono son menores con respecto a los reportados con los datos de REDD+. Por otro lado, se acentúa el patrón de concentración espacial, tanto desde el punto de vista de áreas de conservación, como desde la perspectiva de concentración de los valores altos de depósitos exclusivamente dentro de zonas protegidas. Este patrón espacial de mayor concentración intensifica la situación de algunas áreas de conservación, que presentan un

limitado potencial de mitigación del cambio climático. Además, aumenta la dependencia de este potencial en zonas del país que acumulan la mayor cantidad de áreas protegidas. Estos resultados preliminares plantean la necesidad de profundizar aún más en estas diferencias y sus implicaciones en términos analíticos, para lograr, a futuro, resultados que puedan ser más precisos y ajustados a la realidad de los territorios.

Ciertamente estos resultados plantean una serie de retos para el país. En primer lugar, la definición de estrategias para lograr un aumento más acelerado en el stock nacional de carbono forestal. Esto es un factor determinante para mantener el balance positivo en el sector forestal ante futuros picos de emisiones derivados de presiones antropogénicas y de los sistemas productivos. Pero, al mismo tiempo, es un elemento necesario para alcanzar las metas nacionales de descarbonización. En suma, estos hallazgos muestran que los logros del país en el sector forestal también son vulnerables y la persistencia de retos importantes para consolidar este potencial de mitigación. Además, evidencia la necesidad de actuar desde otros frentes y sectores que trascienden el ámbito forestal.

Así, esta investigación aspira a generar nueva información sobre los niveles de depósitos forestales de carbono, su distribución en el territorio, comportamiento a través del tiempo y el análisis de los flujos y determinadas presiones antropogénicas que han afectado el stock forestal de carbono del país. Esto para generar nuevos insumos que permitan asistir al sector forestal en la reducción del cambio climático. Aunque ciertamente se requiere un análisis más profundo, que permita explorar el vínculo entre los patrones identificados y las políticas públicas, productivas y ambientales del país implementadas a través del tiempo, los hallazgos presentados en esta investigación pueden dar luces para guiar estrategias en el sector, que abarquen la reducción de emisiones derivadas de la deforestación y el fortalecimiento de los depósitos de carbono, para así maximizar su potencial de mitigación.

## **Trabajo futuro**

Debido a limitaciones en las fuentes de datos y al alcance del presente trabajo, se identifican áreas de análisis que no fueron abordadas en la investigación. En esta sección se detallan algunas de estas áreas que, debido a su relevancia, constituyen oportunidades de trabajo futuro que permitirían un mayor nivel de profundidad a nivel analítico.

En primer lugar, los resultados en cuanto al balance neto en el sector forestal y los depósitos de carbono en territorio nacional, muestran la importancia de desarrollar nuevas líneas de trabajo que analicen las implicaciones de los patrones identificados en términos sobre la contabilidad nacional de carbono y su efecto en el reclamo de compensaciones por la conservación de dicho stock.

Por otro lado, de manera complementaria a la presente investigación, es de gran importancia llevar a cabo un análisis con un enfoque socioeconómico para explorar más a fondo los impulsores de la deforestación y sus patrones espaciales y temporales. Esto permitiría comprender la participación del sector privado (incluyendo pequeños, medianos y grandes productores) en los cambios de la cobertura forestal y los depósitos forestales de carbono. El uso de datos espaciales del Sistema de Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura del Suelo en

Paisajes Productivos (MOCUPP) es una posible fuente de información para este tipo de análisis, de manera que sea posible explorar las emisiones relacionadas con actividades humanas para las cuales existen datos, a saber, la ganadería y los cultivos de palma aceitera y piña.

Esta información de carácter socioeconómico es un punto de partida para explorar el vínculo entre los patrones identificados y las políticas públicas, productivas y ambientales implementadas a través del tiempo en el país. Para esto es importante considerar que la identificación de relaciones y causalidades no es fácil, pues la información de estas otras dimensiones no es territorial y, a la fecha, no existe una sistematización que integre esta información para todo el periodo. A su vez, en el ámbito de la política pública, un análisis que integre otras capas de información también permitiría analizar la relación entre las limitaciones presupuestarias de las áreas de conservación y la pérdida de depósitos de carbono.

Desde el punto de vista económico, estos hallazgos abren un espacio para explorar la relación entre los patrones de los depósitos forestales de carbono y el crecimiento económico nacional. Otras líneas de trabajo futuro incluyen aspectos como el análisis del impacto de la transición de una economía más sustentada en el agro hacia un sistema más intensivo en servicios. Además, de manera complementaria, existe potencial para llevar a cabo investigación que permita estimar el costo del mantenimiento y recuperación del carbono en ecosistemas forestales. El contraste de este monto con los programas de pagos por resultados podría dar luces sobre el costo real de dichos programas.

Por otro lado, según se detalla en la sección de limitaciones metodológicas, la exclusión del carbono orgánico del suelo es un elemento de gran relevancia que se podría mejorar en futuras versiones de la investigación. Para esto, se podrían utilizar los enfoques metodológicos y fuentes de datos de la Estrategia Nacional REDD+. Otra fuente de información relevante es el trabajo sobre cartografía de carbono en suelos del territorio nacional desarrollado por la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y el INTA (ACCS, 2021). Finalmente, la información generada a partir de la implementación del proyecto RECSOIL para la carbonización y manejo sostenible de los suelos, representa un insumo relevante en cuanto a mapas de secuestro potencial de carbono en suelos agropecuarios (FAO, 2021). El uso de estos insumos, en conjunto con otros acercamientos metodológicos, es fundamental tanto para lograr una contabilidad de carbono más precisa, como para estudiar los efectos que tienen las prácticas de conservación de los suelos sobre su capacidad como reservorio de carbono.

Otro reservorio de carbono de gran interés para futuros trabajos es el carbono azul, es decir, el carbono almacenado de manera natural en ecosistemas marinos y costeros, específicamente en manglares, praderas marinas y marismas (Conservación Internacional, 2019). El aporte de estos ecosistemas en términos de depósitos de carbono es significativo y proporcionalmente mayor con respecto a los ecosistemas forestales, pues tiene una capacidad que se estima es de dos a cuatro veces más grande con respecto a los bosques maduros tropicales (The Blue Carbon Initiative, 2021). La consideración de este reservorio permitiría afinar aún más la contabilidad nacional de depósitos de carbono.

Finalmente, aunque el análisis presentado realiza un primer acercamiento para explorar el papel de las áreas protegidas en los depósitos forestales de carbono del país, el análisis del rol de otros

territorios, como los indígenas y las reservas privadas, es uno de los temas pendientes para futuros trabajos de investigación en esta materia.

## **Bibliografía**

Agresta-Dimap-UCR-UPM. 2015. Informe Final: Generating a consistent historical time series of activity data from land use change for the development of Costa Rica's REDD plus reference level: Protocolo metodológico. Informe preparado para el Gobierno de Costa Rica bajo el Fondo de Carbono del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF).

ACCS. 2021. Publicaciones. En: <<https://www.sueloscr.com/documentos.html>>

Cairns, M.A. et al. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: pp. 1-11.

Cifuentes, M. 2008. Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in tropical secondary forests growing in six life zones of Costa Rica. [Tesis de Doctorado, Oregon State University]. En: <[http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/cifuentes\\_m\\_2008\\_-\\_dissertation\\_agb\\_secondary\\_forests\\_cr.pdf](http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/cifuentes_m_2008_-_dissertation_agb_secondary_forests_cr.pdf)>

Conservación Internacional. 2019. ¿Qué es el carbono azul? En: <<https://www.conservation.org/peru/novedades/2019/10/29/qu%C3%A9-es-carbono-azul>>

CMNUCC. 2021a. Submission: Costa Rica. En: <<https://redd.unfccc.int/submissions.html?country=cri>>

CMNUCC. 2021b. Costa Rica. Biennial update report (BUR). BUR 2. En: <<https://unfccc.int/documents/204842>>

EPA. 2021. Global Greenhouse Gas Emissions Data. En: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>

FAO. 2013. Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales. Estudio FAO Montes N° 172. Roma: FAO.

FAO. 2021. Proyecto de Implementación de RECSOIL en Costa Rica. En: <[http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/GSP/LAC\\_Webinar/Suelos-LAC-RECSOIL-CR\\_Floria\\_Bertsch.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/LAC_Webinar/Suelos-LAC-RECSOIL-CR_Floria_Bertsch.pdf)>

FCPF. 2021. Countries: Costa Rica. En: <<https://www.forestcarbonpartnership.org/country/costa-rica>>

Fonseca, W. 2017. Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*. 51. 91. 10.15359/rca.51-2.5.

Fonseca, W. et al. 2019. "Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono", en *Revista de Ciencias Ambientales* 53 (2).

- Fonseca, W. et al. 2020. “Modelos de biomasa y carbono en ecosistemas forestales naturales en Costa Rica”, en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 19 (2).
- Frédéric, A. 2014. “Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010”, en *Global Change Biology* 20 (8).
- GCF. 2021. Costa Rica REDD-plus Results-Based Payments for 2014 and 2015. En: <<https://www.greenclimate.fund/project/fp144>>
- Harris, N. et al. 2012. “Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions”, en *Science* 336 (6088).
- Holdridge, L. 1966. The Life Zone System. En *Adansonia* VI: 2: 199-203.
- IMN. 2019. Inventario nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de gases efecto invernadero en Costa Rica 2015. San José: Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. 2021. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. En: <[https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum\\_es.html](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html)>
- LEAF. 2021. LEAF Coalition Lowering Emissions by Accelerating Forest finance. En: <<https://leafcoalition.org/>>
- Loustau, D. 2010. Forests, Carbon Cycle and Climate Change. En: <<https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/24749>>
- Minae. 2016. Modified REDD+ Forest reference emission level/forest reference level (FREL/FRL).
- Minae. 2019a. Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. En: <<https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>>.
- Minae. 2019b. Technical Annex of the Republic of Costa Rica in accordance with the provisions of decision 14 / cp. 19.
- Morera, A. (2019) “Dinámica y estructura en ecosistemas forestales y su aporte al ciclo del carbono en la Península de Osa, Costa Rica. [Tesis de Doctorado, Universidad de Salamanca]. En: <[https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/15234/TFG\\_Albert%20Morera%20Beita.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/15234/TFG_Albert%20Morera%20Beita.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>
- Morison, J. et al. 2012. Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain. Edimburgo: Forestry Commission.
- Numata, I. et al. 2010. Biomass collapse and carbon emissions from forest fragmentation in the Brazilian Amazon. En *Journal of Geophysical Research*, 115. doi:10.1029/2009JG001198, 2

- Obando, G. et al. 2021. Validación de las estimaciones de biomasa del inventario nacional forestal de Costa Rica. Working paper en desarrollo por REDD y CATIE.
- Olofsson, P. et al. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148, 42-57.
- Pedroni, L. y Villegas, J. 2016. Manual de la Herramienta Excel “AAAA.MM.DD - FREL&MRV TOOL CR.xlsx.” Carbon Decisions International. En: <[https://drive.google.com/file/d/14CsE\\_rpBBrEJgyUTplzIKKsGGVm\\_YtL\\_/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14CsE_rpBBrEJgyUTplzIKKsGGVm_YtL_/view?usp=sharing)>.
- PNUD. 2009. Linking Climate Change Policies To Human Development Analysis and Advocacy: A Guidance Note for Human Development Report Teams. En: <<http://hdr.undp.org/en/content/linking-climate-change-policies-human-development-analysis-and-advocacy>>
- PNUD. 2011. Mercado doméstico voluntario de carbono de Costa Rica. En: <<https://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/library/mercado-domestico-voluntario-carbono.html>>
- Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC. 2015. Inventario Nacional Forestal de Costa Rica 2014-2015. Resultados y Caracterización de los Recursos Forestales. San José: Programa Regional REDD/CCAD-GIZ.
- REDD+. 2019. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal de Costa Rica: Diseño de Monitoreo para la Estrategia Nacional REDD+.
- REDD+. 2021. ER Monitoring Report (ER-MR). En: <pendiente consultar con REDD+>.
- Retana-Chinchilla, L. et al. 2019. Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un bosque primario intervenido de la zona protectora "El Rodeo", Costa Rica. En *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 7 (3).
- Saatchi, S. et al. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108. 9899-904. 10.1073/pnas.1019576108.
- The Blue Carbon Initiative. 2021. About Blue Carbon. En: <<https://www.thebluecarboninitiative.org/about-blue-carbon#co2>>

---

<sup>i</sup> Valor estimado por el INF sin incluir el componente CO<sub>2</sub> en el suelo.

<sup>ii</sup> Este valor excluye la Isla del Coco (238,500 ha) que no fue contemplada para efectos de este análisis.

<sup>iii</sup> Cada mapa de cobertura está expresado en términos de dos años, por ejemplo, MCS 1985/86. Según se indica en Agresta-Dimap-UCR-UPM (2015), esto se hace con el fin de hacer explícito el hecho de que los mapas fueron contruidos a partir de imágenes adquiridas en una ventana de tiempo de 14 meses. Lo anterior con el fin de minimizar la superficie cubierta por nubes. Así, por ejemplo, el mapa de cobertura 1985/86, representa la situación en el terreno al 31.12.1985 y al 01.01.1986. Esto también ocurre en los mapas de cohortes posteriores. Sin embargo, para efectos de simplicidad, en esta investigación se indica el año para el momento final del período analizado.

<sup>iv</sup> Debido al acercamiento metodológico utilizado para la clasificación de los datos espaciales en categorías, los bosques de palma no incluyen las plantaciones de palma aceitera. Dichas plantaciones forman parte de la categoría de uso de suelo denominada como cultivos.

<sup>v</sup> En el caso de estimaciones de biomasa, estas fueron incluidas en la base y se estimó la densidad carbono multiplicando el valor por la fracción de carbono (CF) recomendada por el IPCC, es decir, 0.47.

<sup>vi</sup> El país se encuentra dividido en once áreas de conservación, sin embargo, para efectos de este trabajo, debido a la falta de información, los análisis no consideran el Área de Conservación Marina Cocos (ACMC).

<sup>vii</sup> Siguiendo la lógica del INF, las estimaciones de Obando et al. (2021) distinguen entre los tipos de bosque: maduro, secundario, manglar y bosque de palma. Las primeras dos categorías (maduro y secundario) incluyen los bosques muy húmedos y pluviales, húmedos y secos.

<sup>viii</sup> Por un lado, no incluye datos de existencias de carbono para las tierras no forestales. Además, no aporta información sobre las densidades de carbono en bosques secundarios según cohorte de edad, por tanto, hace imposible estimar los cambios en el stock de carbono de bosques secundarios que permanecen como tales.