

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

**Priorización de áreas para restauración en el Corredor
Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica**

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para el proceso de candidatura para optar al grado de

Magister Scientiae en

Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad

Por

Simón Torres-Gaviria

Turrialba, Costa Rica, 2024

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DE
BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

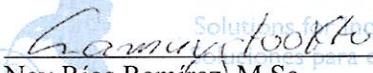
FIRMANTES:



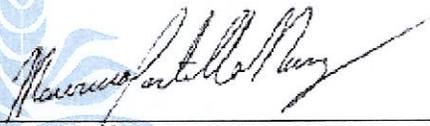
Róger Villalobos Soto, M.Sc.
Codirector de tesis



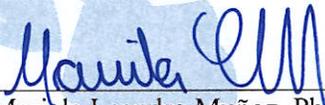
Diego Delgado Rodríguez, M.Sc.
Codirector de tesis



Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mauricio Castillo Núñez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, Escuela de Posgrado



Simón Eduardo Torres Gaviria
Candidato

Índice de contenido

Índice de figuras.....	IV
Índice de cuadros	IV
Lista de acrónimos	V
Dedicatoria.....	V
Agradecimientos	VI
Palabras claves	1
Resumen.....	1
Keywords	1
Abstract	2
Introducción.....	2
Metodología.....	4
Área de estudio.....	4
Identificación de SE relevantes dentro del CBVCT y factores de degradación	6
Determinación de las áreas de provisión de SE	7
Provisión de hábitat para la biodiversidad	7
Regulación de la erosión	8
Reducción del riesgo de deslizamientos	8
Provisión de agua para producción de energía.....	9
Provisión general de Servicios Ecosistémicos	9
Mapeo de degradación	10
Priorización de áreas para restaurar y validación.....	10
Resultados.....	11
Identificación participativa de SE y percepciones de los actores clave	11
Mapeo de Servicios Ecosistémicos	13
Mapeo de degradación	14
Identificación de áreas prioritarias para restaurar	15
Discusión	17
Percepciones de los actores clave	17
Mapeo de Servicios Ecosistémicos	18
Degradación	18
Priorización de áreas	19
Recomendaciones para futuros estudios	21
Conclusiones.....	21
Bibliografía	23

Índice de figuras

<i>Figura 1. Mapa de usos del suelo en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca adaptado de Luiza Amante (2020).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 Mapas de provisión de los servicios ecosistémicos de interés en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 Provisión general de servicios ecosistémicos en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 Mapa de áreas consideradas degradadas en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 Áreas marcadas para restaurar en el mapa de división administrativa de los distritos dentro del Corredor Biológico.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 Mapa de áreas prioritarias para restaurar en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 Comparación de los mapas generados en este estudio con los resultados obtenidos en el proyecto de Zonas Esenciales para la Vida en Costa Rica..</i>	<i>20</i>

Índice de cuadros

<i>Cuadro 1 Porcentaje de actores clave que mencionaron las respuestas más frecuentes para los temas consultados en las entrevistas semiestructuradas.</i>	<i>12</i>
<i>Cuadro 2 Percepciones de los actores clave del cambio de uso de suelo en el CBVCT en los últimos 15 años</i>	<i>12</i>

Lista de acrónimos

Sigla	Significado
Catur	Cámara de Turismo de Turrialba
CB	Corredor biológico
CBVCT	Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca
Comcure	Comisión Ordenamiento Manejo Cuenca Río Reventazón
ELSA	<i>Essential Life Support Areas/ Zonas Esenciales para la Vida</i>
Fonafifo	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
Icafe	Instituto del Café de Costa Rica
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
Minae	Ministerio de Ambiente y Energía
PNCB	Programa Nacional de Corredores Biológicos
Sinac	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SE	Servicios Ecosistémicos
Senara	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
UCR	Universidad de Costa Rica

Dedicatoria

A mi mamá, a mis amigos y a mi familia...

y un poco a mí también. :)

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi madre: María Cristina Gaviria, por ser el principal pilar en mi crianza y educación, por formarme con curiosidad por el mundo natural y por acompañarme desde que existo para poder llegar a ser la persona que soy hoy. Por tus consejos, apoyo, cariño y por siempre apoyarme para lograr mis objetivos. Gracias, mamá.

Agradezco a mi familia por apoyarme siempre, por abrirme sus hogares y compartir conmigo, por haber sido una parte fundamental de mi crianza y, más que nada, por creer en mí.

A mis docentes, desde aquellos que me acompañaron en mi infancia hasta el Comité Asesor que me apoyó en la realización de esta tesis de maestría. Gracias a ustedes, he desarrollado competencias que me han permitido avanzar y crecer como profesional y como persona. Sepan que su labor como formadores no pasa desapercibida. Gracias en particular a Roger Villalobos, Diego Delgado, Ney Ríos y Mauricio Castillo, por su acompañamiento y consejos para que este proyecto de tesis pudiera realizarse.

A Naty y a todo el staff de la cafetería del CATIE, gracias por recibirme tan cálida y amablemente y por no dejarme morir de hambre.

Al Comité Gestor del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca y a los distintos actores e instituciones que me brindaron información valiosa sobre el contexto del Corredor Biológico, sin ustedes este trabajo no hubiese sido posible.

Gracias a la Fundación para el Futuro de Colombia (Colfuturo) por darme la oportunidad de tener una formación internacional para adquirir conocimientos y herramientas para hacer de Colombia un mejor país.

Agradezco especialmente a mis compañeros y amigos del CATIE, que me acompañaron en todo el proceso de maestría. Les estaré eternamente agradecido por su ayuda, comprensión, escucha y alegrías compartidas. Ustedes formaron una parte fundamental de mi formación y de mi vida, que mi salud mental pudiera mantenerse hasta este momento se debe en gran medida a ustedes. Gracias especiales a Marcella, Ireana, Enrique, Carissa, Gustavo y Danilo, ustedes fueron mi familia en mi estancia en el CATIE. Les estaré siempre agradecido a la vida por haberme juntado con ustedes y por permitirme compartir este tiempo con personas tan maravillosas.

Palabras claves

Restauración, Servicios Ecosistémicos, Degradación, Calidad de hábitat, Erosión, Provisión de agua, Reducción de desastres, Entrevistas Semiestructuradas

Resumen

En la actualidad, múltiples ecosistemas se encuentran degradados o en proceso de degradación, lo cual pone en riesgo la provisión de servicios ecosistémicos (SE) y, por lo tanto, el bienestar humano. Este estudio en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca plantea una metodología para identificar áreas para restaurar a partir de datos sobre la provisión de SE y degradación. Se mapearon cuatro SE de interés para los actores locales utilizando InVEST, ARIES y reclasificación, según el uso de suelo basada en la literatura.

Mediante superposición espacial ponderada, se juntaron estos mapas para obtener uno general de provisión de SE. Se utilizó el índice de vegetación EVI y datos obtenidos de entrevistas semiestructuradas con los actores clave para producir un mapa de áreas degradadas y, finalmente, se priorizaron las áreas para restaurar mediante un taller con los actores clave del territorio.

Se destaca la importancia de conservar áreas boscosas en los distritos de Chirripó, La Suiza, Pejibaye y Tayutic para mantener la provisión de servicios ecosistémicos (SE). Las áreas priorizadas para restauración incluyen zonas cercanas al volcán Turrialba, el Humedal Lacustrino Bonilla Bonillita y las redes de conectividad en Tres Equis. Este proyecto demuestra la utilidad de incorporar las perspectivas de actores clave a estudios espaciales a escala de paisaje, con lo cual se priorizaron las áreas para restaurar y mejorar la provisión de SE utilizando bases abiertas de datos espaciales, información de los actores clave y una metodología fácilmente replicable.

Keywords

Restoration, Ecosystem Services, Degradation, Habitat quality, Erosion, Water provision, Disaster reduction, Semi-structured interviews.

Abstract

Currently multiple ecosystems are degrading, which puts the provision of Ecosystem Services (ES) and therefore human well-being at risk. This study in the Volcánica Central-Talamanca Biological Corridor proposes a methodology to identify areas to restore based on information on ES provision and degradation. 4 ESs of interest to local stakeholders were mapped using InVEST, ARIES and reclassification according to land use based on literature review. Using weighted spatial overlay these maps were put together to obtain a map of the overall ES provision. The EVI vegetation index and data obtained from semi-structured interviews with key actors were used to produce a map of degraded areas and finally the areas to be restored were prioritized through a workshop with the key actors of the territory. The importance of conserving forested areas in the districts of Chirripó, La Suiza, Pejibaye and Tayutic is highlighted to maintain the provision of ecosystem services. The areas prioritized for restoration include those near the Turrialba Volcano, the Bonilla Bonillita Wetland and the connectivity networks in Tres Equis. This project demonstrates the usefulness of incorporating the perspectives of stakeholders into spatial studies at the landscape scale, managing to prioritize areas to restore and improve the provision of ES using open spatial databases, information from local stakeholders and an easily replicable methodology.

Introducción

La época geológica actual, denominada Antropoceno, se caracteriza por los amplios impactos a escala global de la actividad humana, particularmente los impactos ecológicos negativos (Steffen et al. 2011, Cork et al. 2023).

Estos impactos ecológicos dan lugar a un dilema entre el desarrollo económico y la conservación. El desarrollo económico ha traído beneficios para muchas personas, pero la forma como este se consigue ha generado efectos negativos sobre los ecosistemas y la biodiversidad sobre la que se sustentan los servicios ecosistémicos (SE) (Liu et al. 2020, Sun et al. 2021) que a su vez contribuyen al bienestar humano (Reid et al. 2005).

El uso de la biodiversidad como componente de estrategias de vida o de desarrollo de actividades productivas ha contribuido al bienestar humano y el desarrollo económico muchas veces a costa de degradar múltiples procesos y SE (Reid et al. 2005, Hasanah et al. 2020, Kosanic y Petzold 2020, Yongxiu et al. 2020) al cambiar los componentes y estructuras de los ecosistemas, ya sea al intervenir estos espacios con diversos fines productivos, alterarlos o eliminarlos para la construcción de infraestructura (Fu et al. 2013, Hasanah et al. 2020, Sun et al. 2021).

La extensión de los bosques, ecosistemas que proveen múltiples SE, se ha venido reduciendo a nivel global. Se ha estimado que de 2010 hasta 2020 la pérdida neta de bosque en el planeta fue de aproximadamente 4.7 millones de hectáreas por año (FAO 2020), que en las últimas décadas casi mil millones de hectáreas de bosque han sido degradadas y requieren restauración (ITTO 2020) y que entre 2015 y 2022 se perdieron 33.5 millones de hectáreas de bosque húmedo primario (University of Maryland and World Resources Institute 2024). Los bosques influyen en los patrones climáticos, provisión de agua dulce y alimentos, mitigación de desastres naturales, biodiversidad y salud humana y su pérdida o degradación puede reducir el flujo de los SE que proveen (Brandon 2014).

La definición de degradación ecológica ha cambiado con el tiempo y se considera un concepto difícil de acuñar (Ghazoul et al. 2015). Sin embargo, sus definiciones en la literatura se pueden agrupar en tres categorías: reducción de servicios ecosistémicos (SE) (Burger et al. 2008, Brandon 2014), disminución de procesos o condiciones que soportan el funcionamiento del ecosistema (Verstraete 1986, Johnson et al. 1997, Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group 2004, Ghazoul y Chazdon 2017, Anshari et al. 2021, Timsina et al. 2022) y reducción de la biodiversidad (Burger et al. 2008, Waite et al. 2009, Yasuhara et al. 2012). Se esperaría que un sistema degradado reduzca su provisión de algunos SE según los componentes del ecosistema que se vean afectados por el proceso y nivel de degradación.

Para recuperar o mejorar la provisión de SE en un paisaje con ecosistemas o coberturas degradadas, se podrían aplicar técnicas de restauración ecológica (Benayas et al. 2009, Shimamoto et al. 2018, Yang et al. 2022), entendiéndola como el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema para que vuelva a tener ciertos valores intrínsecos y provisión de SE valiosos para las personas (Martin 2017). Ya que los recursos para ejecutar las técnicas de

restauración ecológica son limitados, es esencial saber en dónde realizarlas. Una estrategia para conseguirlo consiste en identificar áreas importantes para la provisión de SE, priorizando las áreas que se encuentren degradadas o con baja provisión de SE e implementar ahí las técnicas que permitan la recuperación de la provisión de los SE (Morán-Ordóñez et al. 2022).

El análisis del estado de la provisión de SE y cómo la restauración puede mejorarla es apropiado realizarlo a escala de paisaje. Los ecosistemas se encuentran inmersos en matrices de parches de diferentes coberturas que tienen influencia entre sí, a este sistema de parches se le denomina paisaje (Wu 2013). El enfoque de paisaje se ha identificado como un punto clave para la investigación y desarrollo de procesos para la sostenibilidad (Wu 2012), aporta información sobre la interacción entre los componentes del paisaje (Turner 2005, Wu 2013) y permite comprender dinámicas complejas y a gran escala. Además, el enfoque de paisaje es crucial para comprender los fenómenos de degradación a partir del análisis de los cambios en el uso del suelo y su distribución espacial (Cardinale et al. 2012, Hasan et al. 2020).

Se requiere llenar un vacío de información reportado en la literatura en cuanto a las relaciones entre los servicios ecosistémicos y la restauración, pues se ha encontrado que la mayoría de los artículos se han enfocado principalmente en ecosistemas no tropicales y no han tenido como objetivo del proceso de restauración la provisión de SE (Carlucci et al. 2020).

Este estudio tuvo como fin integrar información sobre áreas críticas para la provisión de SE en el paisaje del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca y áreas que presentan degradación para así identificar aquellas críticas para ser restauradas, de manera que se recuperen o aumenten los SE que proveen para el bienestar de los habitantes del área y del país.

Metodología

Área de estudio

El Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca (CBVCT) se encuentra en la provincia de Cartago en Costa Rica. Es un área donde se aspira a recuperar conectividad biológica entre las grandes masas boscosas remanentes, principalmente las de la Cordillera Volcánica Central y la Cordillera de Talamanca, reconocida como parte del Programa Nacional de Corredores Biológicos (PNCB) (Ramírez Chávez 2006, Barriga et al. 2007). Presenta altitudes desde los 339 msnm hasta los 3340 msnm. Su área aproximada es de 90 750 hectáreas. En términos

biológicos, se ha descrito dentro del corredor las siguientes zonas de vida: bosque muy húmedo tropical, bosque húmedo tropical premontano, bosque muy húmedo tropical premontano, bosque pluvial premontano, bosque muy húmedo tropical montano bajo, bosque pluvial tropical montano bajo y bosque pluvial tropical montano. Dicha diversidad y composición vegetal de los bosques se han relacionado con la altitud, la cual presenta una alta variación dentro del Corredor Biológico (Murrieta et al. 2008).

El Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca (CBVCT) es una iniciativa que busca la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales, gestionada por un comité gestor compuesto por diversos actores e instituciones del territorio (Barriga et al. 2007). Este comité se beneficia de los datos generados por estudios como el presente, que apoyan la mejora en la gestión de recursos y actividades en el área. Además, el CBVCT fomenta la conectividad entre áreas protegidas, como el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte, el Refugio de Vida Silvestre La Marta, la Zona Protectora de la Cuenca del Río Tuis, el Monumento Nacional Guayabo y el Parque Nacional Volcán Turrialba. Estas áreas, situadas entre las cordilleras Volcánica Central y Talamanca, albergan especies endémicas y raras, lo que subraya el valor de este corredor para la biodiversidad regional.

Dentro del CBVCT, se desarrollan actividades como la producción de caña de azúcar y café (Murrieta et al. 2008), turismo y actividades recreativas, como el canotaje o *rafting*. Además, en este paisaje se proveen SE relevantes, como el apoyo a la producción agropecuaria a través de los servicios de polinización y regulación de plagas, el secuestro de carbono, la recreación (Vallet et al. 2016, Vilchez-Mendoza et al. 2022), la producción de agua para usos agropecuarios, para consumo humano y para generación de energía hidroeléctrica. Dentro del territorio se encuentran represas hidroeléctricas importantes, en particular Cachí, Angostura y Reventazón, entre otras menores, ubicadas en la cuenca del río Reventazón (Leguía et al. 2008, Estrada Carmona 2009, Locatelli et al. 2014).

La cobertura dominante es el bosque, seguido por el pasto, así lo ha sido desde 1986 (Brenes Pérez 2009, Luiza Amante 2020). Otras coberturas han disminuido con el tiempo, como el café (Cerdán Cabrera 2007) y las pasturas (Vallet et al. 2016).

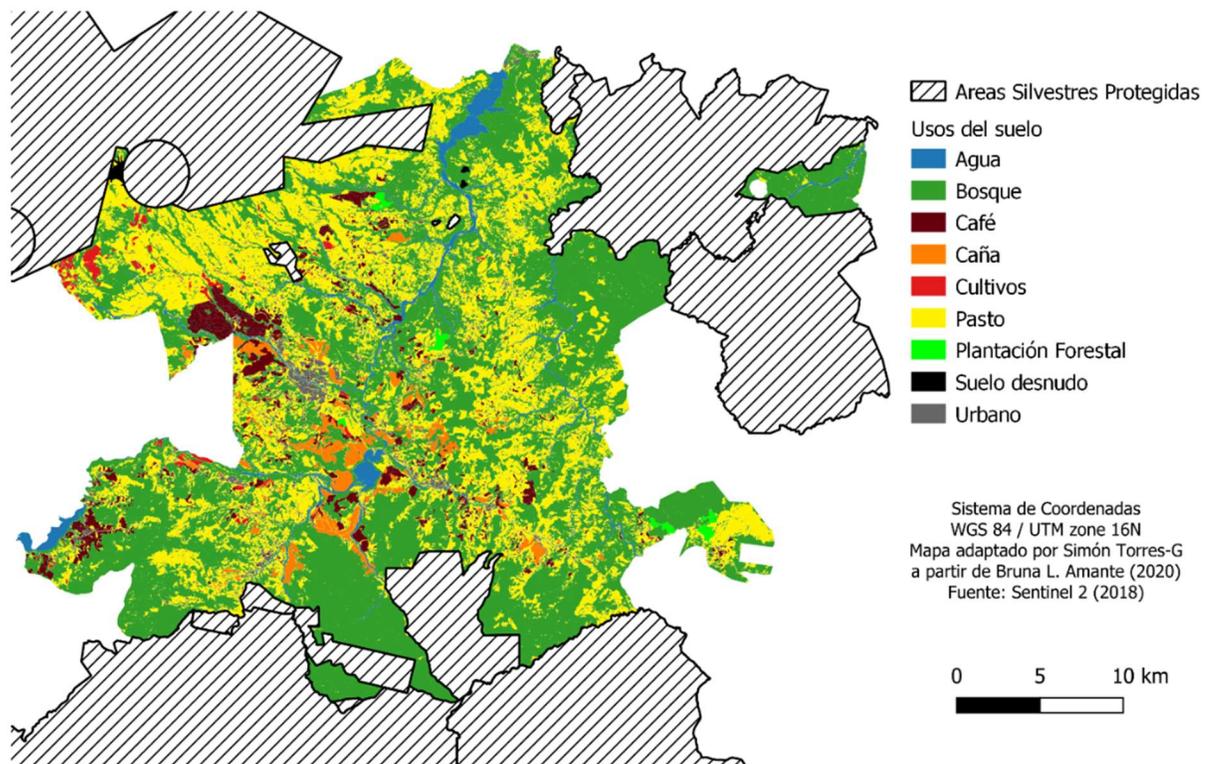


Figura 1. Mapa de usos del suelo en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca adaptado de Luiza Amante (2020)

Identificación de SE relevantes dentro del CBVCT y factores de degradación

Se realizó una revisión bibliográfica para identificar los principales tipos de cobertura y usos del suelo del corredor, así como las características de estos y los SE que proveen.

Conforme a la metodología de Adhikari et al. 2018 y teniendo en cuenta la pertinencia de identificar los servicios ecosistémicos relevantes para la población y determinar la importancia relativa de estos (Hidalgo et al. 2022), se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas a actores clave para conocer las percepciones sobre los SE que los ecosistemas brindan en el CBVCT y los fenómenos de degradación dentro de este territorio. Los actores clave fueron seleccionados por su participación dentro del comité gestor del Corredor Biológico y por pertenecer a organizaciones públicas o privadas con incidencia en las actividades que se desarrollan en el área de estudio.

Se entrevistó a actores de 13 organizaciones, entre ellas instituciones públicas, miembros del comité gestor del Corredor Biológico y organizaciones no gubernamentales (ONG). Las organizaciones consultadas fueron: Comité Gestor del CB, Senara, Comcure, Sinac, UCR,

Catur, Municipalidad de Turrialba, Turrialba Regeneración y Desarrollo/Turrialba Sostenible, ICE, Subcorredor Barbilla, Minae, Icafe y Fonafifo.

Las entrevistas se realizaron por medio de reuniones virtuales y presenciales de una duración media de 40 minutos. Los datos de estas entrevistas se transcribieron y se identificaron los SE más relevantes, así como la prioridad que tienen los SE para los actores entrevistados y las organizaciones en las que trabajan.

Estas entrevistas brindaron, además, información sobre los principales beneficios que obtienen los actores de la naturaleza, las acciones que consideran que degradan o conservan/restauran la naturaleza en el CB, las áreas que identifican como degradadas o bajo un proceso de degradación y las percepciones acerca de los cambios de uso del suelo en el CBVCT para complementar la revisión bibliográfica inicial. En las entrevistas, se les entregó a los actores clave un listado de servicios ecosistémicos a partir del cual se seleccionaron los servicios ecosistémicos que se trabajaron en el estudio.

Determinación de las áreas de provisión de SE

Para el procesamiento y análisis de información espacial se utilizó la versión 3.28.3 del *software* QGIS. Se utilizó el mapa de usos del suelo producido por Luiza Amante (2020), quien utilizó imágenes de Sentinel 2 para el año 2018 (Figura 1). Este fue convertido a formato ráster utilizando la función “rasterizar” de GDAL con un tamaño de píxel de 25x25m. Además, se obtuvo un modelo de elevación digital del set de datos NASADEM en Google Earth Engine, a una resolución de 25 metros.

Para determinar las áreas de provisión de cada SE, se empleó la herramienta InVEST® (Vallet et al. 2016, Salata et al. 2020), la herramienta ARIES for SEE Explorer (Jackson et al. 2013) y se asignaron valores de provisión del servicio por tipo de uso de suelo de manera similar a como se ha hecho en otros estudios (Leguía Hidalgo et al. 2007, Leguía et al. 2008).

Provisión de hábitat para la biodiversidad

Se usó el modelo Calidad del Hábitat de InVEST® versión 3.14.1 (<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>), desarrollado por el Natural Capital

Project (Natural Capital Project 2023) teniendo como hábitats los usos del suelo: caña, plantación forestal, agua, café, cultivo anual o perenne, suelo desnudo, pasto o pasto arbolado, bosque y urbano. A cada uno de estos se le asignó un valor de hábitat en el modelo según el valor de fricción propuesto por Murrieta (2006).

Se convirtieron los datos de fricción para cada uso de suelo de Murrieta (2006) a la escala que presenta InVEST (entre 0 y 1, siendo 1 el valor de los usos del suelo con mayor calidad de hábitat), de modo que los bosques mantienen un valor de 1 (hábitat de mayor valor) y el suelo desnudo, de 0.05 (hábitat de menor valor).

Se tomaron como amenazas en el modelo las carreteras y uso del suelo urbano, asignando el doble de impacto en el hábitat a la cobertura urbana que a la carretera. Se asignó a ambas un decaimiento lineal y una distancia máxima de efecto de 50 metros a carreteras y 100 metros a urbano. Este mapa se reclasificó en 5 categorías definidas por cuantiles, denominadas baja, media-baja, media, media-alta y alta provisión del SE.

Regulación de la erosión

Mediante la herramienta ARIES for SEEA Explorer (United Nations 2021), disponible en <https://klab.officialstatistics.org/modeler>, se obtuvo la capa ráster de suelo retenido por la vegetación (t/ha) para el año 2023 a una escala de 25x25m. Este mapa muestra las áreas donde la vegetación reduce la pérdida de suelo y, por lo tanto, la erosión. Este ráster se reclasificó en 5 clases definidas por cuantiles para tener un ráster final con las categorías de provisión: baja, media-baja, media, media-alta y alta.

Reducción del riesgo de deslizamientos

Se usó la función de GDAL “pendiente” (*slope* en inglés) para obtener un mapa de pendientes a partir del modelo de elevación digital del CBVCT. Se hizo una reclasificación asociando un valor de provisión a cada uso de suelo como se ha reportado en otros estudios (Adhikari et al. 2018) y de acuerdo con la capacidad de reducir la escorrentía de cada uso de suelo reportada en la literatura (Brandon 2014, Grimaldi et al. 2014, El Chami et al. 2020, Zhao et al. 2020, van Meerveld et al. 2021, Luz 2022), asignando los siguientes valores a cada uso de suelo: 5 para

bosques, 4 para plantaciones forestales, 3 para pasto, 2 para cultivos perennes o anuales y café, 1 para caña y 0 para urbano, agua y suelo desnudo.

Se reclasificó el ráster de pendiente en categorías determinadas por cuantiles, según su ángulo de inclinación, y a cada una se le asignó un valor de 1 a 5, dependiendo de qué tan empinada era la pendiente. Considerando la relevancia de la pendiente en el riesgo de deslizamientos (Donnarumma et al. 2013, Meneses et al. 2019), se buscó incorporar la pendiente con los usos del suelo. Para esto, usando la calculadora ráster se multiplicó el ráster de pendiente reclasificada con el ráster de aporte de los usos del suelo a la reducción de desastres para identificar las zonas donde la pendiente es más empinada y la vegetación reduce más la escorrentía, que serían las zonas de más alta provisión del SE. Este ráster se reclasificó en 5 categorías según el nivel de provisión: baja, media baja, media, media alta y alta.

Provisión de agua para producción de energía

Para el SE de agua para energía en la cuenca, se efectuó una reclasificación del mapa de usos de suelo asignando a cada uso un valor entre 1 y 5 con base en Leguía *et al.* (2008), donde 1 es baja provisión del servicio y 5 es alta provisión.

La reclasificación se realizó de la siguiente forma: 5 para cultivos y pasto, 3 para caña y café, 2 para plantación forestal y bosques, 1 para suelo desnudo y urbano y 0 para agua. Las áreas de bosque tuvieron un valor medio de provisión basado en lo reportado en la literatura para el área de estudio (Leguía et al. 2008), debido a que los bosques reducen la escorrentía y aumentan la infiltración en mayor medida que otros usos del suelo (Grimaldi et al. 2014, van Meerveld et al. 2021). Adicionalmente, en este ráster se le incrementó el valor a cada píxel que se encontraba dentro de la cuenca del río Reventazón debido a la gran importancia de esta para proveer energía hidroeléctrica (Leguía et al. 2008, Estrada Carmona 2009, Locatelli et al. 2014).

Provisión general de servicios ecosistémicos

Con base en la información obtenida de las entrevistas para la priorización de los SE y las capas de provisión de cada SE seleccionado, se realizó un proceso de superposición espacial ponderada (Basharat et al. 2016, Salata et al. 2020) para obtener un único mapa de provisión de SE.

Utilizando la herramienta de Calculadora Ráster, se integraron los mapas de SE multiplicando cada uno por un peso determinado basado en la priorización de SE que se obtuvo de las entrevistas a conocedores locales, según la siguiente fórmula:

$$SE_{unidos} = (SE_{habitat} * 4) + (SE_{erosion} * 3) + (SE_{agua} * 2) + (SE_{desastres} * 1)$$

Este mapa fue reclasificado en 5 categorías determinadas por cuantiles, que fueron nombradas de menor a mayor valor: baja, media baja, media, media alta y alta provisión de SE.

Mapeo de degradación

Se calculó el índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*, por sus siglas en inglés) utilizando Google Earth Engine a partir de imágenes del satélite Landsat 9 para el año 2022. Este índice es un indicador del estado de la vegetación y ha sido usado para identificar áreas degradadas (Phompila et al. 2015, Abdel-Kader 2019, Hasanah et al. 2020). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$EVI = 2.5 * ((Band\ 5 - Band\ 4) / (Band\ 5 + 6 * Band\ 4 - 7.5 * Band\ 2 + 1))$$

Se eligió el EVI, pues este ha sido utilizado antes en ecosistemas tropicales (Phompila et al. 2015) y por tener una menor sensibilidad ante el ruido atmosférico y no saturarse ante altos niveles de biomasa (Huete et al. 2002, Zhang et al. 2005).

Se mapearon también las respuestas obtenidas de las entrevistas semiestructuradas con los actores clave, específicamente el número de votos para cada distrito señalado como degradado, identificando los tres distritos más mencionados.

Priorización de áreas para restaurar y validación

Como criterios para definir las áreas prioritarias a restaurar, dada la falta de acceso a información sobre áreas prioritarias de provisión de los SE tomados en cuenta en este estudio, se asumieron como áreas importantes aquellas con pendiente mayor a 56 % susceptibles de deslizamiento, consideradas como escarpadas o fuertemente escarpadas (Decreto N. ° 41960 MAG-Minae 2019), aquellas a 100 m o menos de las redes de conectividad planteadas para el CBVCT (Murrieta et al. 2008) y por criterio de experto a 1 km o menos de las áreas protegidas que se

encuentran cerca o dentro del Corredor Biológico que serían las áreas de amortiguamiento de las áreas protegidas.

En estas áreas donde la provisión de SE es primordial, se identificaron las zonas donde la provisión de los SE fuera baja o media baja, las cuales fueron las recomendadas para restaurar. De acuerdo con la definición de Burger *et al.* en 2008 y Brandon en 2014, estas áreas también podrían considerarse degradadas por su reducida capacidad de proveer SE.

Posteriormente, en un taller donde se convocó a los actores clave entrevistados, se les entregó una copia de los mapas de áreas prioritarias para restaurar con el fin de validar los resultados obtenidos y realizar una priorización de aquellas que consideran como las más importantes para implementar acciones de restauración. Para esto, también se les mostró el mapa de degradación con el fin de que se tomara en cuenta al elegir las áreas. Finalmente, se registraron los criterios utilizados por los actores para la priorización. Por recomendación de los participantes en el taller, se elaboró un mapa con las áreas prioritarias para restaurar con la división administrativa de los distritos en el CBVCT para una mejor comprensión y comunicación con los actores clave.

Resultados

Identificación participativa de SE y percepciones de los actores clave

Al ser consultados acerca de los beneficios que les aporta la naturaleza, los actores entrevistados mencionaron principalmente la provisión de agua, la biodiversidad y la provisión de alimentos. En términos de la importancia de ciertos servicios ecosistémicos para sus organizaciones en el CB, los actores entrevistados dieron el siguiente orden de prioridad a los SE presentados: 1. agua para consumo humano, 2. agua para uso agrícola, 3. provisión de hábitat para la biodiversidad, 4. reducción del riesgo de inundaciones, 5. agua para producción de energía, y 6. reducción de riesgo de deslizamientos.

Además de estos, los actores entrevistados señalaron el papel de los SE culturales asociados a los recursos hídricos y al turismo en el territorio, así como los SE relacionados con el suelo (fertilidad y conservación del suelo). Durante las entrevistas, los actores recomendaron incorporar a este y futuros estudios SE asociados al suelo (por ejemplo, regulación de la erosión o fertilidad del suelo) y culturales. Las respuestas a los demás elementos de las entrevistas se encuentran resumidas en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Porcentaje de actores clave que mencionaron las respuestas más frecuentes para los temas consultados en las entrevistas semiestructuradas

Áreas señaladas como degradadas dentro del Corredor Biológico Volcánica Central - Talamanca	
Nombre	%
Distrito de Turrialba	46
Cercanías al Volcán Turrialba	33
Distrito de Santa Cruz	26
Distrito de Tres Equis	26
Actividades que degradan la naturaleza en el CB	
Expansión de la frontera agrícola	53
Uso excesivo de agroquímicos	26
Mal manejo de residuos	26
Acciones que restauran o conservan la naturaleza en el CB	
Reforestación	33
Iniciativas de educación ambiental	26
Actividades de organizaciones ambientales	26
Apoyo a iniciativas y proyectos sostenibles	20
Indicadores para identificar un área degradada	
Áreas de producción agrícola con mal manejo	40
Deforestación/pérdida de cobertura forestal	20
Zonas con frecuencia de derrumbes y deslizamientos	20

Cuadro 2. Percepciones de los actores clave del cambio de uso de suelo en el CBVCT en los últimos 15 años

Cambio del uso del suelo	
Bosque	Aumento
Pastos	Aumento
Café	Disminución
Caña	Disminución
Urbano/industrial	Aumento

Mapeo de servicios ecosistémicos

La Figura 2 muestra la distribución espacial de los SE trabajados en el estudio. A través de la superposición espacial ponderada, se generó la Figura 3. Las imágenes muestran que las mayores áreas de provisión se encuentran al sur y al este del Corredor Biológico, a excepción del SE de provisión de agua para producción de energía, el cual muestra mayores valores en la zona noroccidente del CB. Con base en el mapa de provisión general de servicios ecosistémicos, las áreas de mayor provisión se ubican en los distritos Chirripó, el sur de La Suiza, el sur de Pejibaye y el sur de Tayutic.

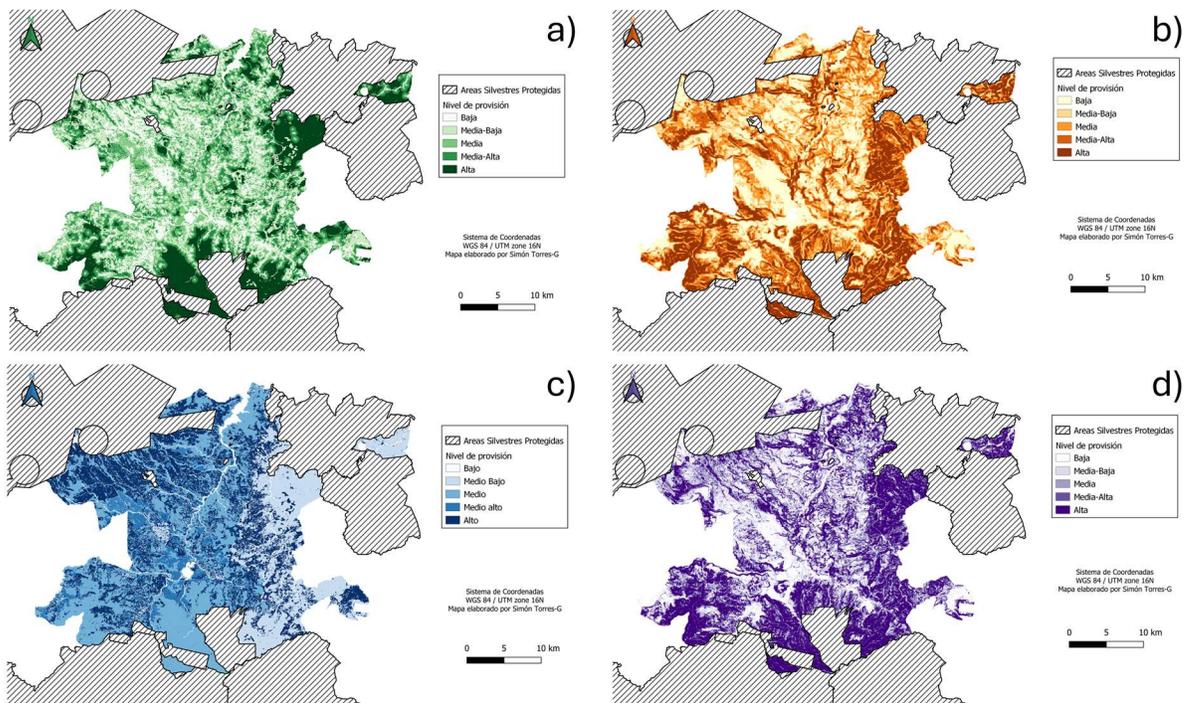


Figura 2 Mapas de provisión de los servicios ecosistémicos de interés en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca: a) provisión de hábitat para la biodiversidad; b) reducción de la erosión; c) provisión de agua para producción de energía; d) reducción de desastres.

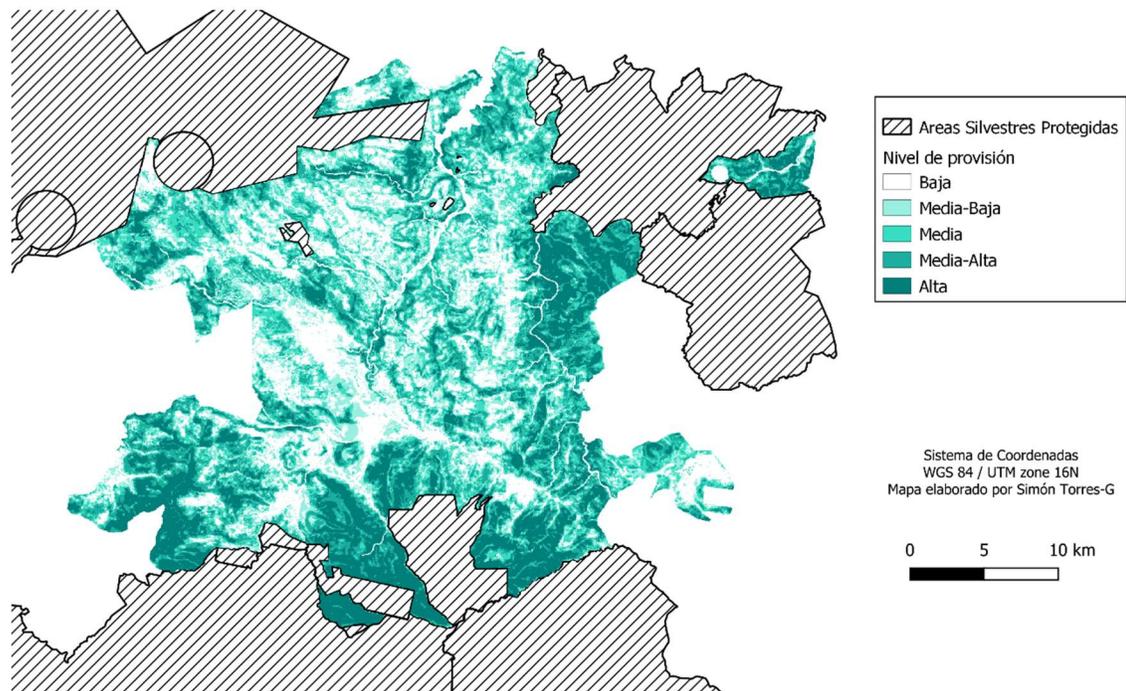


Figura 3 Provisión general de servicios ecosistémicos en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca a partir de la provisión de los 4 servicios ecosistémicos de interés integrado mediante superposición espacial ponderada.

Mapeo de degradación

En la Figura 4, se observan los valores del índice EVI. En este, los valores bajos se pueden relacionar con bajos niveles de biomasa, plantas con problemas de salud o usos del suelo sin cobertura vegetal. Además, se resaltan los 3 distritos más mencionados en las entrevistas semiestructuradas como degradados: Tres Equis, Turrialba y Santa Cruz.

En las áreas de valores más bajos del EVI dentro de los distritos señalados, se pueden encontrar principalmente áreas de suelo desnudo o uso del suelo urbano. Una tendencia similar se observa en el resto del CB, donde valores bajos de EVI corresponden con asentamientos humanos y usos del suelo urbanos. Cabe señalar que las áreas de agua (como embalses) se eliminaron del mapa, pues presentaban valores muy bajos de EVI, que no corresponden a ningún valor o interpretación del índice.

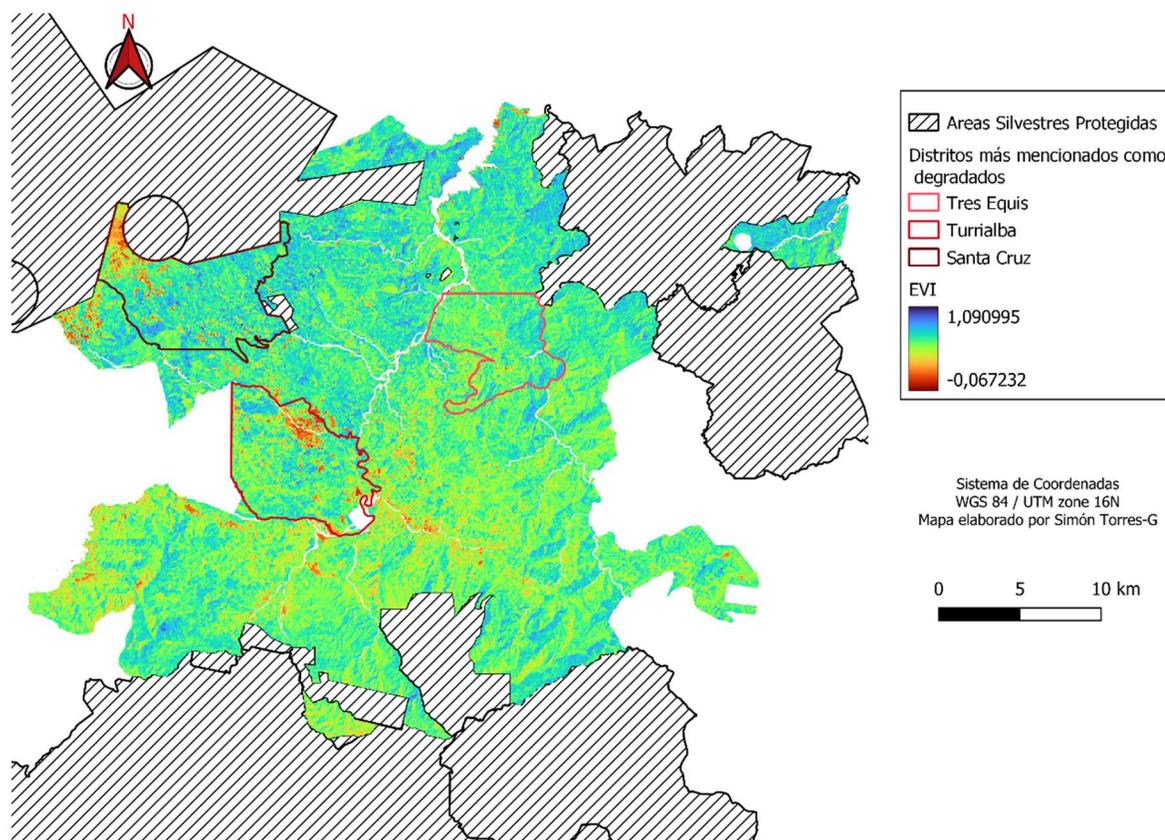


Figura 4 Mapa de áreas consideradas degradadas en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca según el Índice de Vegetación Mejorada (EVI). Se delimitan los distritos más mencionados como degradados por los actores clave (Santa Cruz, Turrialba y Tres Equis).

Identificación de áreas prioritarias para restaurar

En total, se priorizaron 5664.5 hectáreas para restaurar. Estas se ubican, en mayor medida, en las zonas cercanas a las áreas protegidas, particularmente al norte del Corredor Biológico, en los distritos de Santa Cruz, Santa Teresita y Florida (Figura 5), en las cuales se podría incrementar la cobertura arbórea para establecer zonas de amortiguamiento. En cambio, en el interior del Corredor, las áreas señaladas corresponden con secciones de la red de conectividad construida por Murrieta (2007), las cuales, al incrementar su cobertura arbórea, contribuirían a la conectividad y el movimiento de la biodiversidad por el CBVCT.

Al realizar el taller de validación, los actores dieron el visto bueno a las áreas seleccionadas y coincidieron en que las áreas más urgentes de ser intervenidas son aquellas que se encuentran cerca del volcán Turrialba, por el mal manejo agrícola y cambio de uso de suelo que se da allí; seguidas por las áreas que rodean el Humedal Lacustrino Bonilla Bonillita, por su importancia

ecológica y para prevenir la erosión y deslizamientos. En cuanto a las áreas cercanas a las redes de conectividad, las más priorizadas para intervenir fueron aquellas en el distrito de Tres Equis, por los cambios de uso de suelo reportados por los actores clave en este distrito (Figura 6).

Los criterios en los que se basaron los actores para la priorización fueron: la protección del recurso hídrico desde las zonas altas, el riesgo de cambio de uso de suelo a uno menos sostenible y, finalmente, la mejora de la conectividad en el paisaje. En este ejercicio, todos coincidieron en la importancia de colaborar con los gobiernos municipales y entidades como el ICE y el Ministerio de Agricultura y Ganadería para que las iniciativas de restauración puedan tener los impactos deseados.

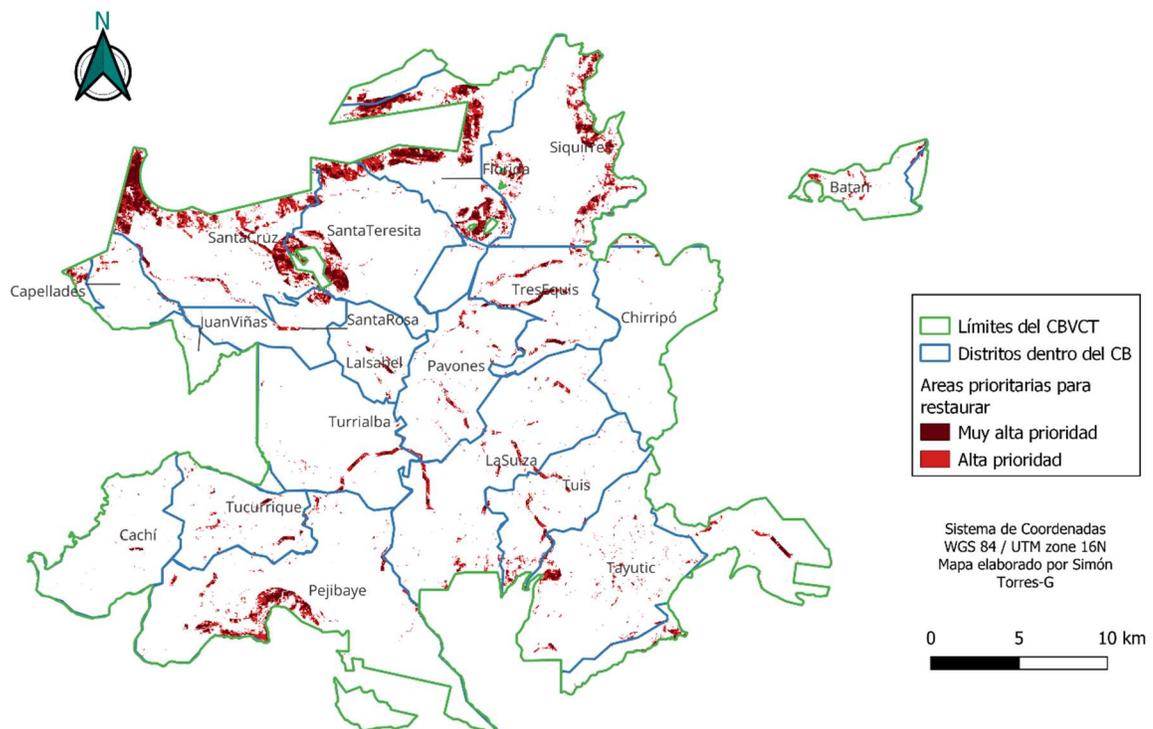


Figura 5 Áreas marcadas para restaurar en el mapa de división administrativa de los distritos dentro del Corredor Biológico.

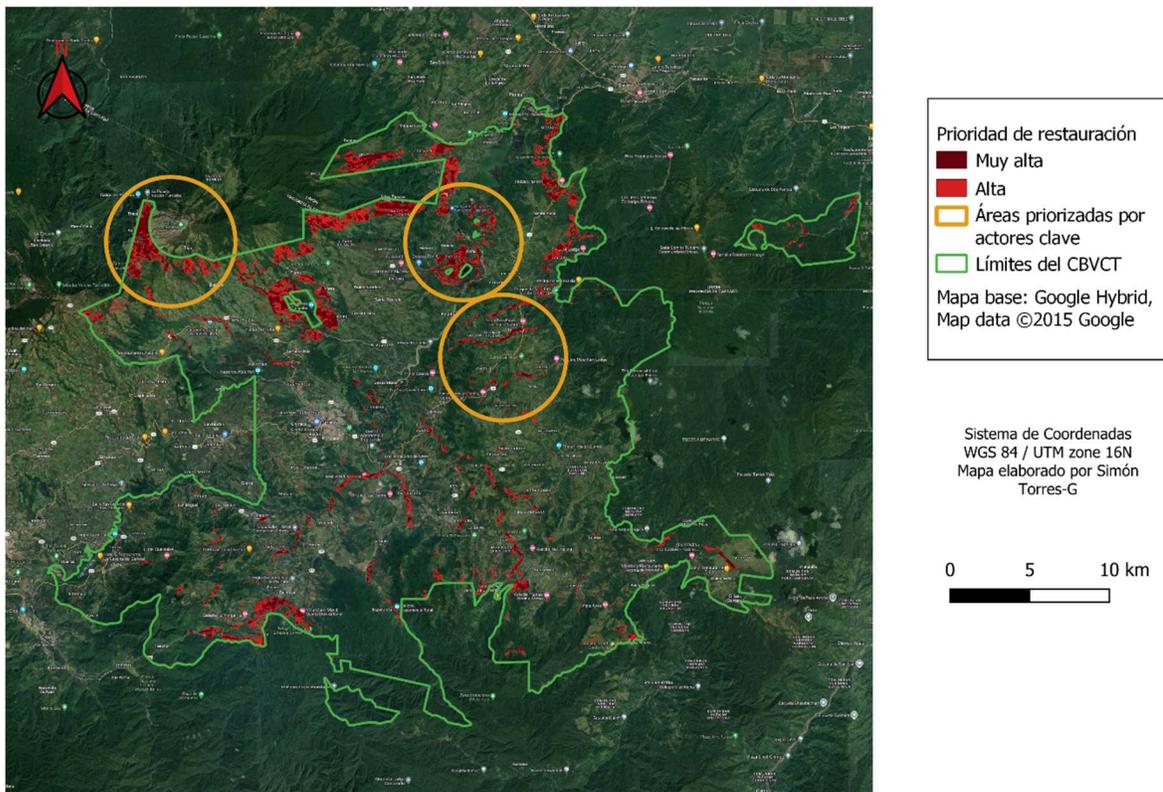


Figura 6 Mapa de áreas prioritarias para restaurar en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca

Discusión

Percepciones de los actores clave

En cuanto a la percepción de los actores sobre los cambios en el uso del suelo en el CB, la disminución del café coincide con lo reportado por Cerdán Cabrera (2007) y por el Icafe (Icafe, 2023). Sin embargo, la percepción del aumento en pasturas contrasta con lo encontrado por Vallet *et al.* (2016), quienes reportaron que las pasturas estarían reduciéndose.

Esta diferencia puede deberse a que el rango temporal que cubre cada fuente es diferente: el estudio de Vallet *et al.* 2016 trabaja con datos de 1986 a 2008, mientras que las respuestas de los actores claves corresponden a los últimos 15 años (2009-2024). Otra fuente que puede resolver esta diferencia es el set de datos GLAD Global Land Cover and Land Use Change (Potapov *et al.* 2022), donde se muestra que en el periodo 2000-2020 la ganancia de pasturas (vegetación corta en el set de datos) ha sido mayor que la pérdida.

Se enlistaron múltiples actividades que contribuyen a la conservación y restauración de la naturaleza, lo que refleja un interés de los actores y las comunidades locales en cuidado del medio ambiente como se ha reportado antes en la literatura (Ramírez Chávez 2006).

Mapeo de servicios ecosistémicos

Para la mayoría de SE, las zonas de más alta provisión fueron aquellas con cobertura forestal. Esto coincide con lo reportado en la literatura, donde se señala el valor de los bosques tropicales como fuente de múltiples SE, como la provisión de hábitat, energía y madera, la reducción de la escorrentía y la regulación de la erosión (Brandon 2014, Alamgir et al. 2016, Shimamoto et al. 2018, Riis et al. 2020).

Al comparar el mapa de provisión de SE con los presentados por Estrada Carmona en 2009, se encuentran coincidencias parciales con los mapas del SE de control de la erosión. La principal diferencia radica en que las áreas marcadas como muy importantes en el estudio de Carmona corresponden a áreas de provisión media o media alta en este estudio.

Esta diferencia puede explicarse por la inclusión de múltiples SE en este estudio, el peso relativo que se le dio a cada uno en la superposición espacial ponderada y por el uso de diferentes metodologías para el mapeo del SE de regulación de la erosión. Según el objetivo de investigación, será mejor escoger una metodología específica si se trabaja con pocos SE (Estrada Carmona 2009), o una más general, que pueda integrar varios tipos de SE, como en este estudio.

Además, el mapeo de SE realizado en este estudio puede ser aplicado para señalar las áreas cuya conservación es importante en función de su provisión de SE. Un estudio de en el CBVCT sobre los parches de hábitat para las especies de abejas *Apis mellifera*, *Tetragonisca angustula* y *Trigona fulviventris* (Luiza Amante 2020) muestra coincidencia de estas áreas con las zonas de mayor provisión de SE presentadas en este estudio.

Degradación

Durante las entrevistas y el taller, los actores clave mencionaron que la concentración de áreas con un EVI bajo en la zona norte de Santa Cruz podría deberse a que se trata de una zona donde la cobertura forestal se eliminó casi por completo de las zonas productivas, dejando una cubierta

de pasto en zonas de pendiente significativa, que en algunos sectores ha pasado luego a un uso de cultivos hortícolas, lo cual genera mayor erosión.

Las demás áreas con bajo EVI (Figura 4) corresponden con usos de suelo urbano o de suelo desnudo y estos usos del suelo, a su vez, tienen menores valores de provisión de SE (Figura 3) en los modelos, metodologías empleadas y en la literatura (Leguía et al. 2008, Zhao et al. 2020). Esto implica la necesidad de intervenir áreas dedicadas a cultivos u otros usos del suelo que dejen el suelo desnudo, para mejorar su provisión de SE, y probablemente conlleve el uso de estrategias como sistemas agroforestales o agricultura regenerativa, pues se trata de áreas donde, desde un punto de vista socioeconómico, no es viable reestablecer áreas de bosque natural.

Priorización de áreas para restaurar

Entre las áreas prioritarias para restaurar, se identificaron pocas en las zonas de alta pendiente. Esto se debe a que estas zonas presentan cobertura forestal y, en general, una alta provisión de los SE de interés.

Al comparar los resultados de este estudio con los reportados por el proyecto de Zonas Esenciales para la Vida (ELSA) (Data to Policy Navigator 2022), específicamente el mapa de “Areas_Esenciales_para_el_Soporte_de_la_Vida” obtenido del SNIT, se ve una coincidencia en las áreas seleccionadas por el proyecto ELSA para proteger con las áreas de alta provisión de SE que se recomendarían para conservar (Figura 6a). Además, múltiples áreas de restauración establecidas en el proyecto ELSA coinciden con las áreas propuestas en este estudio (Figura 6b); en particular, las áreas en Siquirres, alrededor del Monumento Guayabo y la zona norte de Santa Teresita.

No obstante, hay áreas que fueron elegidas para restaurar por el proyecto ELSA que no fueron priorizadas en este estudio. El motivo se puede deber a las diferencias en las metodologías empleadas que tuvieron datos, objetivos y escalas diferentes: El proyecto ELSA utilizó datos de Biodiversidad (Forest Structural Integrity Index, áreas clave para biodiversidad y riqueza de especies amenazadas), adaptación al cambio climático (idoneidad de los cultivos, carbono de la biomasa viva y carbono irrecuperable) y bienestar humano (brecha de rendimiento agrícola, suministro de agua potable y oportunidades de ecologización urbana) y se realizó a escala nacional para todo Costa Rica (PNUD Costa Rica 2022) con el objetivo de mejorar el estado de

ecosistemas frágiles o degradados para reducir las amenazas del cambio climático (Data to Policy Navigator 2022). En cambio, este proyecto se llevó a cabo teniendo en cuenta los intereses de los actores clave del CBVCT, mapeando SE relevantes para estos y trabajando a una escala más local con el objetivo de dar información al comité gestor del Corredor Biológico.

Ambos enfoques presentan información valiosa: los datos desarrollados por el proyecto ELSA son de especial interés a escala nacional y recopilan múltiples enfoques e intereses, en cambio este proyecto resulta más valioso a escala local y para el comité gestor del CB, pues utiliza datos más específicos y a una escala menor con enfoque en los intereses de los actores clave e instituciones en el Corredor Biológico.

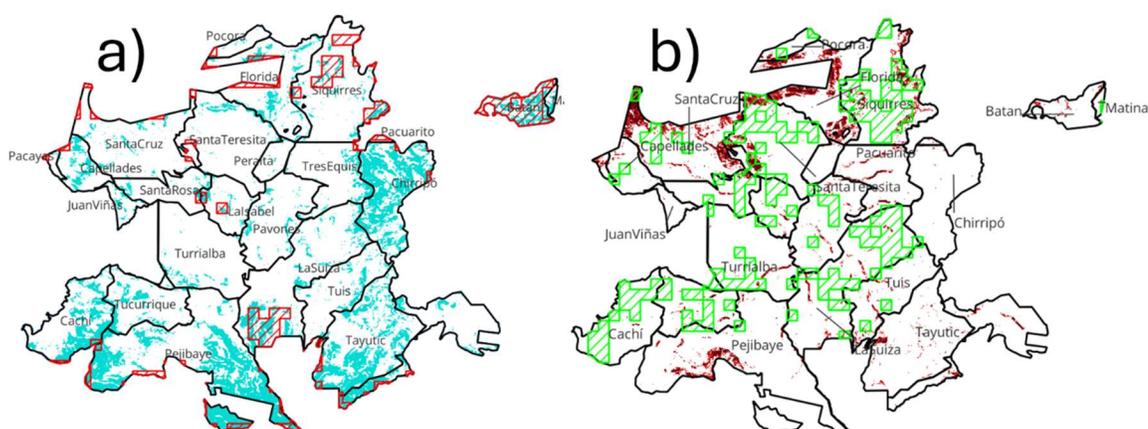


Figura 7 Comparación de los mapas generados en este estudio con los resultados obtenidos en el proyecto de Zonas Esenciales para la Vida en Costa Rica. En líneas negras se muestran los límites de los distritos dentro del CB. Mapa a) zonas de alta provisión de SE del CBVCT, en líneas diagonales rojas las áreas destinadas a protección en el mapa del proyecto Zonas Esenciales para la Vida en Costa Rica; Mapa b) áreas prioritarias para restaurar y sobre este en color verde las áreas seleccionadas para restauración por el proyecto Zonas Esenciales para la Vida en Costa Rica.

El estudio de Morán-Ordóñez *et al.* (2022) en el CBVCT también identificó áreas para restaurar que coinciden con las prioritarias del presente estudio. Específicamente, existe una coincidencia de las sugeridas por este estudio con las que Morán-Ordóñez *et al.* (2022) clasifican como de menor costo de oportunidad (desde una perspectiva económica) para la restauración. Es interesante esta convergencia de áreas recomendadas para restaurar, pues en ambos casos se analizaron diferentes servicios ecosistémicos.

Recomendaciones para futuros estudios

En este estudio, no se consideraron SE culturales debido a los limitantes de tiempo y disponibilidad de información espacial al respecto; sin embargo, se recomienda que estos se incluyan en futuros estudios, pues son de gran valía para las organizaciones con incidencia en el CBVCT. Para esto existen múltiples metodologías y marcos conceptuales reportados en la literatura que podrían adaptarse a las necesidades del corredor, como el mapeo participativo mediante entrevistas a los habitantes o reuniones con expertos y actores clave (Cabana et al. 2020).

Se recomienda también incluir en estudios futuros el mapeo y análisis de los SE de provisión de agua para consumo humano, pues este fue uno de los servicios más votados como importantes dentro del Corredor Biológico por los actores clave, y fue debido al limitado acceso a información reciente y de buena resolución en el área de estudio que no se pudo incluir en este estudio. Otro enfoque con el que futuros estudios podrían aportar es el estudio de las zonas de protección de los ríos, las cuales contribuyen a la provisión de SE hídricos y han sido identificadas por los actores clave como áreas necesarias para restaurar e investigar.

Finalmente, se recomienda que las acciones de restauración se den en el marco de la gestión integral de paisajes, pues este enfoque permite una participación de los actores en el territorio y da herramientas para que distintos sectores puedan colaborar para alcanzar objetivos de gestión sostenible (1000 Landscapes for 1 Billion People 2022). Tras implementar las acciones de restauración, sería óptimo que se utilicen herramientas de monitoreo para confirmar que estas sean exitosas y para evidenciar los cambios y beneficios que generen. Para lograr lo anterior, los futuros investigadores podrían basarse en protocolos ya descritos en la literatura que funcionan para evaluar los impactos de las acciones de restauración como el Índice de sustentabilidad para la restauración de paisajes (Zamora Cristales et al. 2020).

Conclusiones

En este trabajo, se propone a los gestores del CBVCT dos enfoques para la priorización de zonas de restauración del paisaje: la primera es trabajar en las zonas cercanas a las Áreas Silvestres Protegidas, consolidando así áreas de amortiguamiento, para reducir el efecto borde sobre los ecosistemas conservados; la segunda es establecer cobertura vegetal que facilite el tránsito de la biodiversidad por el CB, fortaleciendo las redes de conectividad propuestas por Murrieta (2006)

y que en varios sectores constan de franjas de bosque de poco grosor, susceptibles al efecto de borde de otros usos de la tierra y a su posible deforestación.

Para mantener la provisión de los SE, es preciso que las áreas boscosas en los distritos Chirripó, el sur de La Suiza, el sur de Pejibaye y el sur de Tayutic sean conservadas y se eviten cambios de uso del suelo que puedan afectar su capacidad de proveer SE.

Las áreas priorizadas para restaurar por los actores clave fueron aquellas cercanas al volcán Turrialba, seguidas por las áreas que rodean el Humedal Lacustrino Bonilla Bonillita y las áreas cercanas a las redes de conectividad en el distrito de Tres Equis.

Existen similitudes con otros trabajos de mapeo de SE e identificación de áreas para restaurar. En cuanto a las diferencias, se deben a emplear metodologías y escalas distintas; por lo tanto, es importante elegir la escala y metodología más pertinentes según los objetivos del estudio. En este proyecto, se consideró óptimo el uso de metodologías con una escala local, que incluyeran las percepciones de los actores clave y que, además de dar información clara a los miembros del Comité Gestor del CBVCT, pudieran ser replicadas sin mucha dificultad al usar como fuentes de información bases de datos abiertas y disponibles al público.

A partir de lo encontrado en este estudio, se propone una definición para el concepto de degradación ecosistémica en el paisaje. Cabe aclarar que no se define precisamente como un indicador único para todo el paisaje, pues no se reduce a clasificar un paisaje como degradado o no, ya que en la diversidad de parches y usos de suelo habría zonas que están degradadas y otras no. Por lo tanto, la definición identificaría como áreas con degradación ecosistémica aquellas con una baja o disminuida capacidad de proveer servicios ecosistémicos de interés.

Uno de los principales aprendizajes de este proyecto fue la importancia de incorporar a los estudios a escala de paisaje las percepciones y conocimiento de los actores locales, pues este permite poner en contexto la información espacial y contribuir a explicar las dinámicas que llevan al estado actual del paisaje, además de facilitar la aplicación de este conocimiento en la formulación de actividades y políticas territoriales.

Finalmente, se demostró que sí es posible priorizar áreas para restaurar utilizando información de actores clave y bases abiertas de datos espaciales usando una metodología fácil de replicar y aplicar en otros espacios para contribuir a una mejora en la provisión de los SE que brinda un paisaje.

Bibliografía

- 1000 Landscapes for 1 Billion People. 2022. *A Practical Guide to Integrated Landscape Management*. Washington, DC, EcoAgriculture Partners, on behalf of 1000 Landscapes for 1 Billion People.
- Abdel-Kader, F.H. 2019. Assessment and monitoring of land degradation in the northwest coast region, Egypt using Earth observations data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 22(2):165–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.02.001>.
- Adhikari, S.; Baral, H.; Nitschke, C. 2018. Identification, Prioritization and Mapping of Ecosystem Services in the Panchase Mountain Ecological Region of Western Nepal. *Forests* 9(9):554. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090554>.
- Alamgir, M; Turton, SM; Macgregor, CJ; Pert, PL. 2016. Assessing regulating and provisioning ecosystem services in a contrasting tropical forest landscape. *Ecological Indicators* 64:319–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.016>.
- Anshari, G.Z.; Gusmayanti, E.; Novita, N. 2021. The use of subsidence to estimate carbon loss from deforested and drained tropical peatlands in Indonesia (online). *Forests* 12(6):732. DOI: <https://doi.org/10.3390/F12060732/S1>.
- Barriga, M; Campos, JJ; Corrales, OM; Prins, C. 2007. *Gobernanza ambiental, adaptativa y colaborativa en bosques modelo, cuencas hidrográficas y corredores biológicos: diez experiencias en cinco países latinoamericanos* (online). Turrialba, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1649>.
- Basharat, M.; Shah, H.R.; Hameed, N. 2016. Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences* 9(4):292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2308-y>.
- Benayas, J.M.R; Newton, A.C.; Diaz, A.; Bullock, J.M. 2009. Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science* 325(5944):1121–1124. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1172460>.
- Brandon, K. 2014. Ecosystem Services from Tropical Forests: Review of Current Science. *SSRN Electronic Journal*. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2622749>.

- Brenes Pérez, C.F. 2009. *Análisis multitemporal de cambio de uso del suelo y dinámica del paisaje en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica* (online). Tesis de Maestría. Turrialba, CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4473>.
- Burger, J.; Gochfeld, M.; Pletnikoff, K.; Snigaroff, R.; Snigaroff, D.; Stamm, T. 2008. Ecocultural Attributes: Evaluating Ecological Degradation in Terms of Ecological Goods and Services Versus Subsistence and Tribal Values. *Risk Analysis* 28(5):1261–1272. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01093.x>.
- Cabana, D.; Ryfield, F; Crowe, TP; Brannigan, J. 2020. Evaluating and communicating cultural ecosystem services. *Ecosystem Services* 42:101085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101085>.
- Cardinale, B.J.; Duffy, J.E.; Gonzalez, A.; Hooper, D.U.; Perrings, C.; Venail, P.; Narwani, A.; MacE, GM; Tilman, D; Wardle, DA; Kinzig, AP; Daily, GC; Loreau, M; Grace, JB; Larigauderie, A; Srivastava, DS; Naeem, S. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity (online). *Nature* 2012 486:7401 486(7401):59–67. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11148>.
- Carlucci, MB; Brancalion, PHS; Rodrigues, RR; Loyola, R; Cianciaruso, M V. 2020. Functional traits and ecosystem services in ecological restoration (online). *Restoration Ecology* 28(6):1372–1383. DOI: <https://doi.org/10.1111/REC.13279>.
- Cerdán Cabrera, CR. 2007. *Conocimiento local sobre servicios ecosistémicos de cafeticultores del Corredor Biológico Volcán Central Talamanca, Costa Rica* (online). Tesis de Maestría. Turrialba (Costa Rica), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). . <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4675>.
- El Chami, D; Daccache, A; El Moujabber, M. 2020. What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well-being? A review. *Annals of Agricultural Sciences* 65(2):188–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aoads.2020.10.001>.
- Cork, S; Alexandra, C; Alvarez-Romero, JG; Bennett, EM; Berbés-Blázquez, M; Bohensky, E; Bok, B; Costanza, R; Hashimoto, S; Hill, R; Inayatullah, S; Kok, K; Kuiper, JJ; Moglia, M; Pereira, L; Peterson, G; Weeks, R; Wyborn, C. 2023. Exploring Alternative Futures

in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 48(1):25–54. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-095011>.

Data to Policy Navigator. 2022. *Uso de la planificación territorial para reducir las amenazas del cambio climático* (en línea, sitio web). <https://www.datatopolicy.org/use-case/costa-rica>.

Donnarumma, A; Revellino, P; Grelle, G; Guadagno, FM. 2013. *Slope Angle as Indicator Parameter of Landslide Susceptibility in a Geologically Complex Area*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. p. 425–433 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_56.

Estrada Carmona, N. 2009. *Identificación de áreas prioritarias en la oferta de servicios ecosistémicos para establecer esquemas de pagos (PSA) direccionados, Costa Rica* (online). Tesis de Maestría. Turrialba, CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2332>.

FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020 - Key findings*. Roma, s.e. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

Fu, B; Wang, S; Su, C; Forsius, M. 2013. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5(1):4–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.12.002>.

Ghazoul, J; Burivalova, Z; Garcia-Ulloa, J; King, LA. 2015. Conceptualizing Forest Degradation (online). *Trends in Ecology and Evolution* 30(10):622–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.001>.

Ghazoul, J; Chazdon, R. 2017. Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework. *Annual Review of Environment and Resources* 42(1):161–188. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060736>.

Grimaldi, M; Oszwald, J; Dolédec, S; Hurtado, M del P; de Souza Miranda, I; Arnauld de Sartre, X; Assis, WS de; Castañeda, E; Desjardins, T; Dubs, F; Guevara, E; Gond, V; Lima, TTS; Marichal, R; Michelotti, F; Mitja, D; Noronha, NC; Delgado Oliveira, MN; Ramirez, B; Rodriguez, G; Sarrazin, M; Silva, ML da; Costa, LGS; Souza, SL de; Veiga, I; Velasquez, E; Lavelle, P. 2014. Ecosystem services of regulation and support

- in Amazonian pioneer fronts: Searching for landscape drivers (online). *Landscape Ecology* 29(2):311–328. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10980-013-9981-Y/TABLES/6>.
- Hasan, SS; Zhen, L; Miah, MG; Ahamed, T; Samie, A. 2020. Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development* 34:100527. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2020.100527>.
- Hasanah, A; Supriatna; Indrawan, M. 2020. Assessment of tropical forest degradation on a small island using the enhanced vegetation index. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 481(1):012061. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/481/1/012061>.
- Hidalgo, F.; Villalobos, R.; Imbach, A.; Guevara, N. 2022. *Identificación participativa de elementos estratégicos para restaurar el paisaje del Bosque Modelo Río Huayabamba-Abiseo, Perú*. (en línea). Serie RESTAURación, Turrialba, Costa Rica, CATIE. No. 2, 84 p.
- Huete, A; Didan, K; Miura, T; Rodriguez, EP; Gao, X; Ferreira, LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1–2):195–213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Icafe. (2023). *Estadísticas de la caficultura de Turrialba*. s.l., s.e.
- ITTO. 2020. Guidelines for forest landscape restoration in the tropics. *ITTO Policy Development Series*, 24 .
- Jackson, B; Pagella, T; Sinclair, F; Orellana, B; Henshaw, A; Reynolds, B; McIntyre, N; Wheeler, H; Eycott, A. 2013. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. *Landscape and Urban Planning* 112(1):74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2012.12.014>.
- Johnson, DL; Ambrose, SH; Bassett, TJ; Bowen, ML; Crummey, DE; Isaacson, JS; Johnson, DN; Lamb, P; Saul, M; Winter-Nelson, AE. 1997. Meanings of Environmental Terms

- (online). *Journal of Environmental Quality* 26(3):581–589. DOI: <https://doi.org/10.2134/JEQ1997.00472425002600030002X>.
- Kosanic, A; Petzold, J. 2020. A systematic review of cultural ecosystem services and human wellbeing. *Ecosystem Services* 45:101168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101168>.
- Leguía, EJ; Locatelli, B; Imbach, P; Pérez, CJ; Vignola, R. 2008. Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica (online). *Ecosistemas* 17(1). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/111>.
- Leguía Hidalgo, EJ; Locatelli, B; Imbach, PA; Alpízar Rodríguez, F; Vignola, R; Pérez, CJ. 2007. Servicios ecosistémicos e hidroelectricidad en Nicaragua (online). *Recursos Naturales y Ambiente* (51–52):40–47. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6807>.
- Liu, Y; Zhu, J; Li, EY; Meng, Z; Song, Y. 2020. Environmental regulation, green technological innovation, and eco-efficiency: The case of Yangtze river economic belt in China. *Technological Forecasting and Social Change* 155:119993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119993>.
- Locatelli, B; Imbach, P; Wunder, S. 2014. Synergies and trade-offs between ecosystem services in Costa Rica. *Environmental Conservation* 41(1):27–36. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892913000234>.
- Luiza Amante, B. 2020. *La conectividad funcional y los servicios ecosistémicos proporcionados por abejas en los agropaisajes del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica* (online). s.l., CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9856>.
- Luz, FB da. 2022. *Sugarcane cultivation effects on soil physical properties, functions, and related-ecosystem services*. Piracicaba, Universidade de São Paulo. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.11.2022.tde-03012023-114757>.
- MAG-Minae. 2019. *Establecimiento de la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas de Costa Rica*. MAG-Minae.

- Martin, DM. 2017. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century (online). *Restoration Ecology* 25(5):668–673. DOI: <https://doi.org/10.1111/REC.12554>.
- van Meerveld, HJ (Ilja); Jones, JPG; Ghimire, CP; Zwartendijk, BW; Lahitiana, J; Ravelona, M; Mulligan, M. 2021. Forest regeneration can positively contribute to local hydrological ecosystem services: Implications for forest landscape restoration. *Journal of Applied Ecology* 58(4):755–765. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13836>.
- Meneses, BM; Pereira, S; Reis, E. 2019. Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(3):471–487. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-471-2019>.
- Morán-Ordóñez, A; Hermoso, V; Martínez-Salinas, A. 2022. Multi-objective forest restoration planning in Costa Rica: Balancing landscape connectivity and ecosystem service provisioning with sustainable development. *Journal of Environmental Management* 310:114717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114717>.
- Murrieta, E.; Finegan, B.; Delgado, D.; Villalobos, R.; Campos, J. J. 2008. Propuesta para una red de conectividad ecológica en el en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52:69-76.
- Natural Capital Project. 2023. *InVEST 3.14.1*. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences.
- Phompila, C.; Lewis, M.; Ostendorf, B.; Clarke, K. 2015. MODIS EVI and LST Temporal Response for Discrimination of Tropical Land Covers. *Remote Sensing* 7(5):6026–6040. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70506026>.
- PNUD Costa Rica. 2022. *Mapping hope: nature for climate Using spatial data to harness nature's power in Costa Rica* (en línea, sitio web). <https://pnudcr.exposure.co/mapping-hope-nature-for-climate>.
- Potapov, P; Hansen, MC; Pickens, A; Hernandez-Serna, A; Tyukavina, A; Turubanova, S; Zalles, V; Li, X; Khan, A; Stolle, F; Harris, N; Song, X-P; Baggett, A; Kommareddy, I; Kommareddy, A. 2022. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change

Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing* 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>.

- Ramírez Chávez, J.R. 2006. *Prioridades sociales y arreglos institucionales para la gestión local del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica* (online). Tesis de Maestría. Turrialba, Published by Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4051>.
- Reid, W.V.; Mooney, H.A.; Cropper, A.; Capistrano, D.; Carpenter, S.R.; Chopra, K.; Dasgupta, P.; Dietz, T.; Duraiappah, A.K.; Hassan, R. 2005. *Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. s.l., Island Press.
- Riis, T.; Kelly-Quinn, M.; Aguiar, F.C.; Manolaki, P.; Bruno, D.; Bejarano, M.D.; Clerici, N.; Fernandes, M.R.; Franco, J.C.; Pettit, N.; Portela, A.P.; Tammeorg, O.; Tammeorg, P.; Rodríguez-González, PM; Dufour, S. 2020. Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *BioScience* 70(6):501–514. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>.
- Salata, S.; Giaimo, C.; Alberto Barbieri, C.; Garnero, G. 2020. The utilization of ecosystem services mapping in land use planning: the experience of LIFE SAM4CP project (online). *Journal of Environmental Planning and Management* 63(3):523–545. DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1598341>.
- Shimamoto, C.Y.; Padiá, A.A.; da Rosa, C.M.; Marques, M.C.M. 2018. Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. *PLOS ONE* 13(12). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>.
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. s.l., s.e.
- Steffen, W.; Persson, Å.; Deutsch, L.; Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Richardson, K.; Crumley, C.; Crutzen, P.; Folke, C.; Gordon, L.; Molina, M.; Ramanathan, V.; Rockström, J.; Scheffer, M.; Schellnhuber, H.J.; Svedin, U. 2011. The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship (online). *Ambio* 40(7):739. DOI: <https://doi.org/10.1007/S13280-011-0185-X>.

- Sun, Y.; Li, Y.; Yu, T.; Zhang, X.; Liu, L.; Zhang, P. 2021. Resource extraction, environmental pollution and economic development: Evidence from prefecture-level cities in China. *Resources Policy* 74:102330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102330>.
- Timsina, S.; Hardy, N.G; Woodbury, D.J.; Ashton, M.S.; Cook-Patton, S.C.; Pasternack, R.; Martin, M.P. 2022. Tropical surface gold mining: A review of ecological impacts and restoration strategies (online). *Land Degradation & Development* 33(18):3661–3674. DOI: <https://doi.org/10.1002/LDR.4430>.
- Turner, M.G. 2005. Landscape Ecology: What Is the State of the Science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36(1):319–344. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614>.
- United Nations. (2021). *System of Environmental-Economic Accounting—Ecosystem Accounting: Final Draft*. s.l., s.e.
- University of Maryland; World Resources Institute. 2024. *Global Primary Forest Loss* (en línea, sitio web). www.globalforestwatch.org.
- Vallet, A.; Locatelli, B.; Levrel, H.; Pérez, C.B.; Imbach, P.; Carmona, N.E.; Manlay, R.; Oszwald, J. 2016. Dynamics of ecosystem services during forest transitions in Reventazón, Costa Rica. *PLOS ONE* 11(7). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158615>.
- Verstraete, M.M. 1986. Defining desertification: A review (online). *Climatic Change* 9(1–2):5–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00140520/METRICS>.
- Vilchez-Mendoza, S.; Romero-Gurdián, A.; Avelino, J.; DeClerck, F.; Bommel, P.; Betbeder, J.; Cilas, C.; Beilhe, L.B. 2022. Assessing the joint effects of landscape, farm features and crop management practices on berry damage in coffee plantations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 330:107903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107903>.
- Waite, T.A.; Corey, S.J.; Campbell, LG; Chhangani, A.K.; Rice, J.; Robbins, P. 2009. Satellite sleuthing: does remotely sensed land-cover change signal ecological degradation in a protected area? *Diversity and Distributions* 15(2):299–309. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00534.x>.

- Wu, J. 2013. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes (online). *Landscape Ecology* 28(6):999–1023. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10980-013-9894-9/FIGURES/4>.
- Wu, J.J. 2012. A landscape approach for sustainability science (online). *Sustainability Science: The Emerging Paradigm and the Urban Environment* 9781461431886:59–77. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3188-6_3/COVER.
- Yang, Q.; Liu, G.; Casazza, M.; Dumontet, S.; Yang, Z. 2022. Ecosystem restoration programs challenges under climate and land use change. *Science of The Total Environment* 807:150527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150527>.
- Yasuhara, M.; Hunt, G.; Breitburg, D.; Tsujimoto, A.; Katsuki, K. 2012. Human-induced marine ecological degradation: micropaleontological perspectives (online). *Ecology and Evolution* 2(12):3242–3268. DOI: <https://doi.org/10.1002/ECE3.425>.
- Yongxiu, S.; Shiliang, L.; Fangning, S.; Yi, A.; Mingqi, L.; Yixuan, L. 2020. Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment* 743:140721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140721>.
- Zamora Cristales, R.; Herrador, D.; Cuéllar, N.; Díaz, O.; Kandel, S.; Quezada, J.; De Larios, S.; Molina, G.; Rivera, M.; Morán-Ramírez, W. (2020). *Índice de sustentabilidad para la restauración de paisajes*. s.l., World Resources Institute.
- Zhang, X.; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; Strahler, A.H.; Liu, Z. 2005. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110(D12). DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JD005263>.
- Zhao, Y.; Liu, Z.; Wu, J. 2020. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology* 35(4):793–814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00980-3>.