



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables

Maestría en Restauración de Paisajes Tropicales

Propuesta de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón

Loja

Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Magíster en
Restauración de Paisajes Tropicales

AUTORES:

Carlos Andrés Burneo Rodríguez

Fernando Israel Torres Jiménez

DIRECTOR:

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 17 de diciembre de 2024

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: Propuesta de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón Loja, previo a la obtención del título de Magister en Restauración de Paisajes Tropicales, de la autoría de los estudiantes Carlos Andrés Burneo Rodríguez, con cédula de identidad Nro. 1104446149 y Fernando Israel Torres Jiménez, con cédula de identidad Nro.1103393417, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado digitalmente por:
JUAN ARMANDO MAITA
CHAMBA

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Nosotros, **Carlos Andrés Burneo Rodríguez** y **Fernando Israel Torres Jiménez**, declaramos ser autores del presente Trabajo de Titulación y eximimos expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido de la misma. Adicionalmente, aceptamos y autorizamos a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de nuestro Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Autor: Carlos Andrés Burneo Rodríguez

Cédula de Identidad: 1104446149

Fecha: 18/12/2024

Correo electrónico:

carlos.burneo@unl.edu.ec

Celular: 0981870069

Autor: Fernando Israel Torres Jiménez

Cédula de Identidad: 1103393417

Fecha: 18/12/2024

Correo electrónico:

fernando.i.torres@unl.edu.ec

Celular: 0984887504

Carta de autorización por parte de los autores, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación

Nosotros, **Carlos Andrés Burneo Rodríguez** y **Fernando Israel Torres Jiménez**, declaramos ser autores del Trabajo de Titulación denominado: Propuesta de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón Loja, como requisito para optar el título de Magíster en Restauración de Paisajes Tropicales, autorizamos al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los diecisiete días del mes de diciembre de dos mil veinticuatro.

Firma:

Autor: Carlos Andrés Burneo Rodríguez

Cédula de Identidad: 1104446149

Fecha: 18/12/2024

Correo electrónico:

carlos.burneo@unl.edu.ec

Celular: 0981870069

Autor: Fernando Israel Torres Jiménez

Cédula de Identidad: 1103393417

Fecha: 18/12/2024

Correo electrónico:

fernando.i.torres@unl.edu.ec

Celular: 0984887504

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.

Dedicatoria

A la memoria de todos los familiares y amigos que ya no están, pero que dejaron huellas imborrables de sabiduría, comprensión y amor, en especial a mis abuelitos Modesto, Hugo y María Esperanza.

A toda mi gran familia, a mis padres Carlos Alfredo y Anita Lucía, a mi abuelita Luchita y a mis tres hermanas, que han sido pilares fundamentales para conseguir la meta propuesta

A mi amada Esposa Pamela Alejandra, que ha sido fuente de inspiración permanente y sostén para ayudarme a conseguir los objetivos de vida y seguir los que aún nos restan por conseguir y juntos.

A mis amigos que son la gran familia que uno no elige pero que siempre se llevan en el corazón.

Carlos Andrés

Este logro es fruto de un largo camino en el que mi familia ha sido mi pilar fundamental. A mis hijos Fernando Aldahir y Ainhoa Thais, quienes con sus sonrisas y abrazos llenan mi vida de alegría y me motivan a ser mejor cada día, les dedico este trabajo como un ejemplo de perseverancia y esfuerzo. A mis padres, Eduardo mi más profundo agradecimiento por sus enseñanzas, consejos y amor incondicional, Martha quien desde el cielo sigue siendo mi guía. A mis hermanos Michael y Christopher, y a mis amigos, quienes estuvieron en las buenas y en las malas, apoyándome constantemente con sus consejos y locuras, gracias por su compañía, apoyo y amistad sincera.

Fernando Israel

Agradecimiento

Dejamos en constancia nuestro agradecimiento a la prestigiosa Universidad Nacional de Loja, referente de la Región Sur, al Programa de Maestría de Restauración de Paisajes Tropicales, muy acertadamente encabezado por su directora Tatiana Ojeda Luna, PhD y a todos los docentes que compartieron sus valiosas experiencias y conocimientos para poder alcanzar esta meta.

De manera especial, nuestra gratitud al Ing. Juan Armando Maita, Mg. Sc. Director de la Tesis y Director del Centro de Investigaciones CITIAB por sus orientaciones, aportes y sugerencias brindadas a lo largo de este trabajo. Así mismo, un agradecimiento a todos los investigadores que forman parte del CITIAB en especial Erick Dario Angamarca Angamarca Mg. Sc. por su apoyo técnico y académico.

Agradecemos a familiares, compañeros y amigos, quienes con su amor, apoyo y risas han hecho más llevadera esta bonita etapa de estudios.

Carlos Burneo y Fernando Torres

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	x
Índice de anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción.....	4
4. Marco teórico	6
4.1. Restauración de paisajes naturales	6
4.2. Restauración ecológica	6
4.3. Modalidades, prácticas y actividades para la restauración de paisajes	6
4.4. Indicadores ecológicos a nivel espacial	7
4.5. Revisión Sistemática	9
4.5.1. Selección de literatura científica	9
4.5.2. Análisis Bibliométrico	10
5. Metodología	12
5.1. Selección de indicadores ecológicos a nivel espacial	13
5.1.1. Análisis bibliométrico de la literatura científica	13
5.1.2. Identificación inicial de indicadores	15

5.1.3. Filtrado de indicadores.....	15
5.2. Proceso de validación de indicadores ecológicos.....	16
5.2.1. Caracterización de indicadores	16
5.2.2. Definición de criterios de calificación.....	16
5.3. Procesamiento de aplicación de indicadores ecológicos	18
5.3.1. Descripción del área de estudio para la aplicación de indicadores	18
5.3.2. Procesamiento con Google Earth Engine	21
6. Resultados.....	25
6.1. Indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes	25
6.1.1. Sistematización de la literatura científica.....	25
6.1.2. Análisis bibliométrico	26
6.1.3. Listado inicial de indicadores identificados	31
6.2. Validación de indicadores a nivel espacial.....	31
6.2.1. Listado y caracterización de indicadores	31
6.2.2. Calificación de indicadores	43
6.3. Aplicación de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes	44
6.3.1. Análisis de anomalías	44
6.3.2. Series temporales para anomalías de los indicadores espaciales.....	46
7. Discusión.....	51
7.1. Análisis de la identificación de indicadores.....	51
7.2. Interpretación de la validación de indicadores	52
7.3. Aplicación de indicadores	54
8. Conclusiones.....	57
9. Recomendaciones.....	58
10. Bibliografía	59
11. Anexos.....	70

Índice de figuras:

Figura 1. Proceso de elaboración de una revisión sistemática.....	9
Figura 2. Diagrama PRISMA y fases de la revisión sistemática.....	10
Figura 3. Procedimiento del proceso de sistematización, validación y aplicación de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de la restauración.....	12
Figura 4. Interfaz de Citespace.....	14
Figura 5. Localización de las parcelas de aplicación en el área de estudio	21
Figura 6. Análisis sistemático de literatura científica	25
Figura 7. Porcentaje de estudios desarrollados en cada uno de los países de investigación.	26
Figura 8. Número de citas por país de publicaciones científicas.....	27
Figura 9. Referencias más citadas de las publicaciones científicas y sus clústers	28
Figura 10. Análisis de citas por revista (journal).....	29
Figura 11. Red de ocurrencias por frecuencia de palabras claves.....	30
Figura 12. Anomalías estándar (1996-2023) de los indicadores espaciales aplicadas en las cinco áreas de estudio: a) La Aguangora, b) Akakana, c) Guaguelpamba, d) Masaca y e) La Argelia.	45
Figura 13. Series temporales de anomalías estandarizadas del área La Aguangora	47
Figura 14. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Akakana.	47
Figura 15. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Guaguelpamba. .	48
Figura 16. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Masaca.....	48
Figura 17. Series temporales de anomalías estandarizadas del La Argelia.	49

Índice de tablas:

Tabla 1. Modalidades y prácticas asociadas establecidas para la restauración forestal ..	7
Tabla 2. Filtros de información para indicadores.....	15
Tabla 3. Rangos para los criterios de calificación.....	16
Tabla 4. Nivel de aplicabilidad de indicadores.....	18
Tabla 5. Practicas de restauración en las cinco parcelas de aplicación.	19
Tabla 6. Filtros de información para indicadores.....	31
Tabla 7. Caracterización de indicadores espaciales para monitoreo de la restaración ..	31
Tabla 8. Calificación de indicadores según los criterios establecidos.....	43
Tabla 9. Valores de la aplicación del test de Mann-Kendall y el estimador Theil-Sen...	50
Tabla 10. Referencias más citadas de las publicaciones científicas y sus clústers.....	103
Tabla 11. Análisis de citaciones por revista (journal)	103
Tabla 12. Ocurrencias por frecuencia de palabras claves.....	104

Índice de anexos:

Anexo 1. Modelo de matriz formato excel de revisión para la literatura científica	70
Anexo 2. Script para cálculo de indicadores (índices espectrales) en GEE (NDVI, AVI, EVI)	73
Anexo 3. Script para el análisis de series temporales de anomalías estandarizadas en el software RStudio	82
Anexo 4. Matriz resumida de extracción de datos de literatura científica de la base de datos Scopus.....	84
Anexo 5. Tablas de análisis bibliométrico	103
Anexo 6. Certificado de traducción del resumen (abstract).....	105

1. Título

Propuesta de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón Loja

2. Resumen

El monitoreo espacial de los paisajes naturales, como parte de las acciones de restauración, permite identificar los cambios en los paisajes a través del tiempo espacio. Es por ello que la restauración de paisajes es una prioridad global en la actualidad, sin embargo, la necesidad de monitorear la calidad del paisaje se ha vuelto cada vez más importante, esto debido a la falta de metodologías estandarizadas para monitorear su progreso a nivel espacial, lo que representa un desafío significativo. En el norte del cantón Loja, a pesar de contar con proyectos de restauración en marcha y una amplia disponibilidad de datos espaciales, la falta de herramientas específicas para evaluar, mediante indicadores ecológicos, la efectividad de las intervenciones de restauración a nivel espacial agrava esta problemática. El objetivo de esta investigación es proponer un conjunto de indicadores ecológicos espaciales para monitorear la dinámica de la restauración de paisajes, los mismos que puedan ser aplicables en diferentes regiones del Ecuador. Mediante la metodología de revisión sistemática de la literatura científica y un análisis bibliométrico, se logró identificar una amplia gama de indicadores ecológicos espaciales para el monitoreo de la restauración (219), de los cuales a través de una serie de filtros aplicados se lograron establecer 19 indicadores para el monitoreo de la restauración. Los indicadores seleccionados se basaron en su relevancia, disponibilidad de datos y capacidad para capturar cambios en la vegetación en el tiempo. Adicionalmente, se realizó la aplicación de los indicadores mejor puntuados (NDVI, AVI y EVI) en la plataforma Google Earth Engine, y se analizaron las tendencias de sus anomalías a lo largo del tiempo mediante pruebas estadísticas no paramétricas (Mann-Kendall). Los resultados de estos análisis permitieron identificar patrones de cambio en la vegetación y monitorear la efectividad de las intervenciones de restauración. En conclusión, esta investigación contribuye al desarrollo de herramientas y metodologías a nivel espacial en entornos de teledetección y sistemas de información geográfica, para el monitoreo de la restauración de paisajes en regiones tropicales. Esta propuesta de indicadores ecológicos espaciales presentada ofrece una base sólida para la evaluación del éxito de las iniciativas de restauración y a su vez facilitará la toma de decisiones en la investigación como para los gestores y administradores, para mejorar la planificación y el seguimiento de los proyectos de restauración en el Ecuador.

Palabras clave: restauración de paisajes, indicadores ecológicos, monitoreo espacial, teledetección.

Abstract

The spatial monitoring of natural landscapes, as part of restoration efforts, allows for the identification of changes in landscapes over time and space. Landscape restoration has become a global priority; however, monitoring landscape quality has grown increasingly important due to the lack of standardized methodologies for tracking progress at the spatial level, which poses a significant challenge. In northern Loja Canton, despite having ongoing restoration projects and an abundance of spatial data, the absence of specific tools to evaluate the effectiveness of restoration interventions through ecological indicators at the spatial level exacerbates this issue. The objective of this research is to propose a set of spatial ecological indicators to monitor landscape restoration dynamics, applicable across different regions of Ecuador. Through a systematic review of scientific literature and bibliometric analysis, a wide range of spatial ecological indicators for restoration monitoring were identified (219). After applying a series of filters, 19 indicators were selected based on their relevance, data availability, and ability to capture changes in vegetation over time. Additionally, the top-performing indicators (NDVI, EVI, AVI) were applied using the Google Earth Engine platform, and their trends over time were analyzed using non-parametric statistical tests (Mann-Kendall). The results of these analyses revealed patterns of vegetation change and provided insights into the effectiveness of restoration interventions. In conclusion, this research contributes to the development of spatial tools and methodologies in remote sensing and geographic information systems for monitoring landscape restoration in tropical regions. The proposed spatial ecological indicators provide a robust foundation for evaluating the success of restoration initiatives, facilitating decision-making for researchers, managers, and administrators to improve the planning and monitoring of restoration projects in Ecuador.

Keywords: landscape restoration, ecological indicators, spatial monitoring, remote sensing

3. Introducción

La restauración de los paisajes naturales emergió como una estrategia para mitigar los efectos negativos de las actividades naturales y antropogénicas, la degradación ambiental y con la finalidad de conservar la biodiversidad (Aronson et al., 2007; Suding et al., 2015). La restauración de los paisajes naturales busca recuperar la funcionalidad ecológica y mejorar los servicios ecosistémicos, mediante un enfoque integral que promueva la recuperación de ecosistemas degradados, la restauración de corredores biológicos y el fomento de prácticas de manejo sostenible del suelo (Chazdon, 2008; Suding et al., 2015). Esta estrategia ha cobrado relevancia debido al creciente impacto de la actividad humana sobre los ecosistemas, particularmente en áreas sometidas a deforestación, expansión agrícola y urbanización.

A nivel global, la deforestación, así como la pérdida de biodiversidad, son desafíos ambientales de gran importancia y que vienen originando la degradación de los ecosistemas. Según la FAO (2022), se estima que durante el periodo 2000 y 2018, casi el 90 % de la deforestación fue causada por actividades agrícolas, lo que refleja una tendencia de degradación del medio ambiente. En el caso de Ecuador, se estima que los bosques nativos se redujeron del 68 % al 56 % del área forestal original entre 1990 y 2018, con un pico de pérdida que ocurrió en la década de los 90 (Sierra et al., 2021). Estos datos recalcan la necesidad de implementar y monitorear acciones de restauración, con la finalidad de que no solo mitigue la degradación, sino también restaurar la funcionalidad de los ecosistemas, mejorando la resiliencia frente al cambio climático (Guerrero Rubio et al., 2020).

En este contexto es importante el monitoreo de los programas de restauración, los mismos que son una pieza fundamental para evaluar su éxito y asegurar la sostenibilidad a largo plazo, así como los recursos económicos que se invierten en estos procesos (Méndez Toribio et al., 2017). En general, el monitoreo de la restauración se basa en indicadores ecológicos, los cuales permiten evaluar los cambios en la biodiversidad, la calidad del suelo, la cobertura vegetal y social (Holl y Aide, 2011). La evaluación de grandes extensiones de restauración presenta varios desafíos, particularmente en la aplicación de indicadores espaciales, los cuales son muy importantes para el seguimiento de los procesos a escalas territoriales.

La falta de un marco metodológico común y de indicadores ecológicos específicos a nivel espacial ha dificultado la comparación y evaluación de los resultados de diferentes

iniciativas de restauración (Montoya, 2019). La variabilidad en los tipos de ecosistemas y en los contextos socioambientales complica aún más esta tarea, puesto que la mayoría de los estudios existentes se han centrado en la evaluación de la biodiversidad de áreas específicas sin abordar el contexto temporal y espacial en el que se producen los cambios (Lambin y Geist, 2006).

En Ecuador, son muchos los esfuerzos para restaurar ecosistemas degradados, pero el hecho de no disponer de una metodología robusta para el monitoreo espacial de estos procesos dificulta la evaluación de su efectividad. Además, la ausencia de indicadores ecológicos a nivel espacial que estén adaptados a las particularidades del país, limita la capacidad de realizar un seguimiento efectivo de la restauración y detectar cambios a gran escala en los paisajes restaurados. Aunque se han desarrollado indicadores generales para monitorear la restauración en otros contextos (UICN y WRI, 2014; Mazón et al., 2019), estos no se ajustan a las evaluaciones de los procesos de restauración a nivel espacial de ecosistemas tropicales y subtropicales, como los presentes en Ecuador. Por lo que se ve necesario desarrollar y validar un conjunto de indicadores ecológicos específicos para el monitoreo espacial de la restauración que permita monitorear grandes extensiones y en diferentes ecosistemas.

En este sentido, la presente investigación establece una propuesta de indicadores ecológicos espaciales, para el monitoreo de la restauración de paisajes. Para el desarrollo de la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Proponer indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón Loja.

Objetivos específicos:

- Identificar indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes.
- Validar los indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes.
- Aplicar los indicadores ecológicos a nivel espacial validados para el monitoreo de la restauración de paisajes.

4. Marco teórico

El presente capítulo es la base conceptual del tema de investigación, para lo cual se realizó una revisión sistemática de la literatura científica existente, estableciendo las bases teóricas necesarias en las temáticas de restauración de paisajes naturales, el uso de indicadores ecológicos a nivel espacial, tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección.

4.1. Restauración de paisajes naturales

La restauración de paisajes naturales se refiere a la recuperación de los ecosistemas terrestres o acuáticos que han sido degradados o que a su vez sufrieron un disturbio natural o por actividades antrópicas. Este proceso se lo realiza con el objetivo de restablecer la estructura, función, biodiversidad original y los servicios ecosistémicos que producen los ecosistemas. La restauración se puede efectuar mediante la reintroducción de especies nativas y el control de las especies invasoras o exóticas que se desarrollan en el área de interés a restaurar, de esta manera busca mejorar de la calidad del suelo y del agua, y la promoción de procesos ecológicos naturales (Gann et al., 2019a).

4.2. Restauración ecológica

Gann et al. (2019b), definen a la restauración ecológica “como el proceso de ayudar a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido”. La restauración ecológica tiene como objetivo ayudar a la recuperación y preservación de los bosques nativos y se refiere a la reparación ambiental de los ecosistemas.

La restauración ecológica se entiende como una actividad destinada a lograr la recuperación significativa de los ecosistemas en relación con un modelo de referencia inicial apropiado, independientemente del tiempo necesario para lograr recuperarlo. Estas actividades permiten la evolución de las especies, así como su adaptación a los cambios locales y globales. Cabe recalcar, que los estándares que se utilizan en el término "restauración", es para referirse a la actividad que se ha iniciado, mientras que el término "recuperación" se refiere al resultado esperado o alcanzado (Gann et al. 2019b).

4.3. Modalidades, prácticas y actividades para la restauración de paisajes

Para facilitar una correcta interpretación de la clasificación de las modalidades, prácticas y actividades para la restauración de paisajes, se ha tomado como referencia la

información del Plan Nacional de Restauración Forestal 2019 – 2030 del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2019), cuya descripción se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1. Modalidades y prácticas asociadas establecidas para la restauración forestal

Modalidad	Restauración Pasiva	Restauración Activa		
Práctica	Regeneración natural asistida	Revegetación Reforestación Enriquecimiento	Recuperación de suelos degradados	Restauración de sistemas productivos
Actividades	Cercado	Siembra directa de semillas Plantado y enriquecimiento con especies nativas y naturalizadas que den inicio a la sucesión ecológica.		
	Control y Vigilancia Erradicación de especies invasoras Implementación de acciones para facilitar la dispersión por especies de fauna	Plantado en núcleos Implementación de acciones para facilitar la dispersión por especies de fauna Traslado de suelo y material vegetal Mantenimiento* de las áreas en procesos de restauración Cercado Post aprovechamiento forestal Erradicación de especies invasoras	Tratamiento físico y mecánico para estabilización de zonas degradadas de suelos	Forestería análoga Enriquecimiento de sistemas agroforestales Enriquecimiento de sistemas silvopastoriles

Nota: *Puede incluir: coronamiento, riego, reposición de plantas y erradicación de especies invasoras.

4.4. Indicadores ecológicos a nivel espacial

Los indicadores ecológicos permiten monitorear de manera espacial las condiciones y cambios ambientales en los procesos de restauración. A través de una integración interdisciplinaria, estos indicadores se adaptan a diferentes escalas geográficas según la disponibilidad de información ambiental en cada caso. Por ello, cada modelo de indicadores debe cumplir con normas y estándares que aseguren la calidad y fiabilidad de los datos obtenidos (Jiménez-Moreno et al., 2019).

El proceso de cambio de la superficie terrestre no es una comparación directa de dos periodos, sino una serie de cambios temporales continuos (Locher-Krause et al., 2017; Rappaport et al., 2015), por tanto, los indicadores a nivel espacial, juegan un papel fundamental en el seguimiento de la restauración de los paisajes naturales, ya que permiten una valoración objetiva y cuantitativa de los avances y resultados de los trabajos de restauración en función de la temporalidad.

Según Pavao-Zuckerman (2015), estos indicadores permiten evaluar la dinámica de la recuperación ecológica en diferentes áreas y a lo largo del tiempo, lo que facilita la identificación de patrones, tendencias y factores que influyen en el éxito de los diferentes proyectos de restauración de paisajes.

Además, los indicadores ecológicos espaciales proporcionan información sobre la funcionalidad de los ecosistemas restaurados. Según Jiménez-Moreno et al. (2019) estos indicadores sirven para monitorear los efectos biofísicos y socioeconómicos a nivel local, regional y nacional, mediante el uso de herramientas tecnológicas precisas que facilitan la predicción de los impactos derivados del proceso de restauración ecológica y su alineación con los objetivos establecidos. Esto incluye la evaluación de aspectos como los flujos de energía, los ciclos de nutrientes, la regulación del agua y la provisión de servicios ecosistémicos. Tipos de indicadores ecológicos a nivel de paisaje.

Porcel-Rodríguez (2017), analizaron diversas experiencias mediante un análisis estadístico de frecuencias de criterios con el objetivo de organizar los indicadores en sistemas de indicadores. Como resultado, establecieron nueve conjuntos de indicadores paisajísticos:

- a) Ecológico-ambientales
- b) Usos del suelo
- c) Patrimoniales e histórico-culturales
- d) Perceptuales
- e) Visuales
- f) Gestión institucional
- g) Valoración económica del paisaje
- h) Uso recreativo
- i) Paisaje urbano

4.5. Revisión Sistemática

Según lo menciona Page et al. (2021), la revisión sistemática es una metodología que permite sintetizar el estado del conocimiento sobre una problemática, facilitando la unificación de la literatura científica y la comparación de resultados y variables asociadas a la pregunta planteada. Este proceso comienza con la formulación de una pregunta de investigación específica y estructurada, que determina los términos de búsqueda utilizados en las bases de datos y el tipo de literatura científica relevante para responder dicha pregunta (Moreno et al., 2018). En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de elaboración de la revisión sistemática.

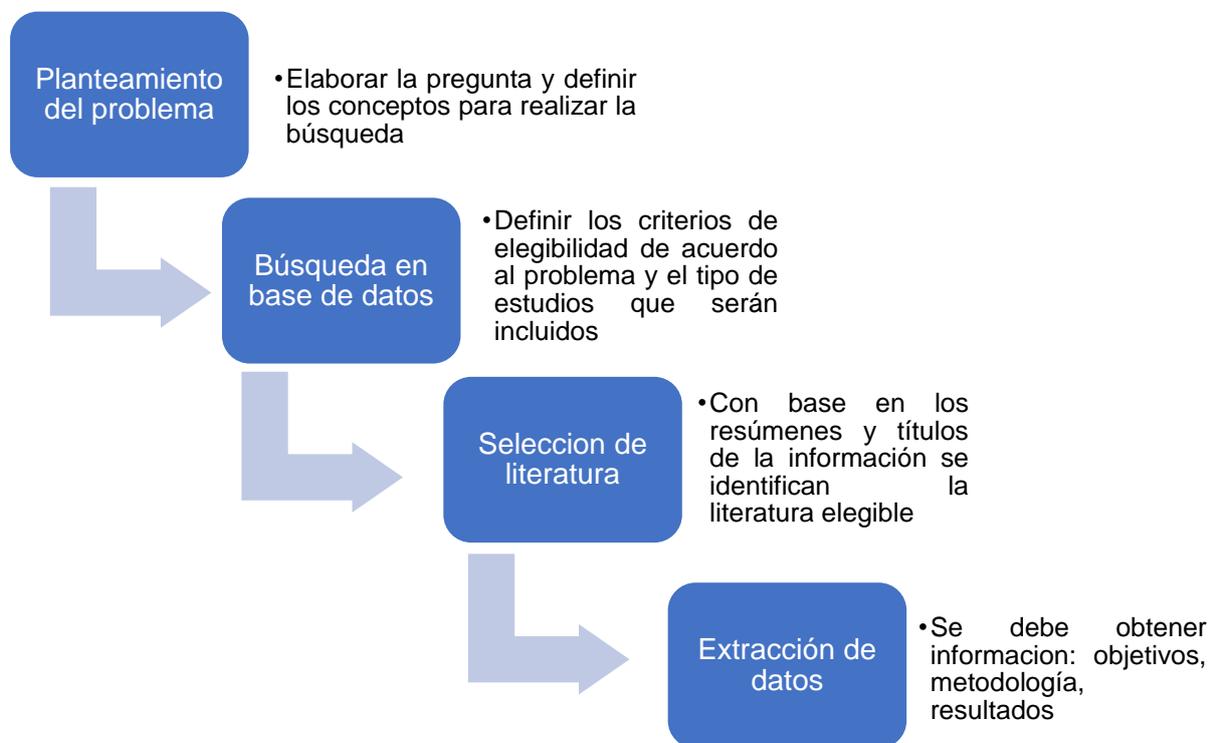


Figura 1. Proceso de elaboración de una revisión sistemática (Fuente: Moreno et al., 2018)

4.5.1. Selección de literatura científica

La selección de literatura científica, aplicando la declaración PRISMA, sigue los criterios de inclusión y exclusión que se hayan establecido (población, tipos de investigación, variables que se recogerán, comparaciones, resultados) y que de la misma manera guarden relación con la pregunta de investigación. Para la selección de la literatura científica que forma parte de la

revisión científica a utilizarse, se deben seguir las directrices PRISMA, como se muestra en la Figura 2.

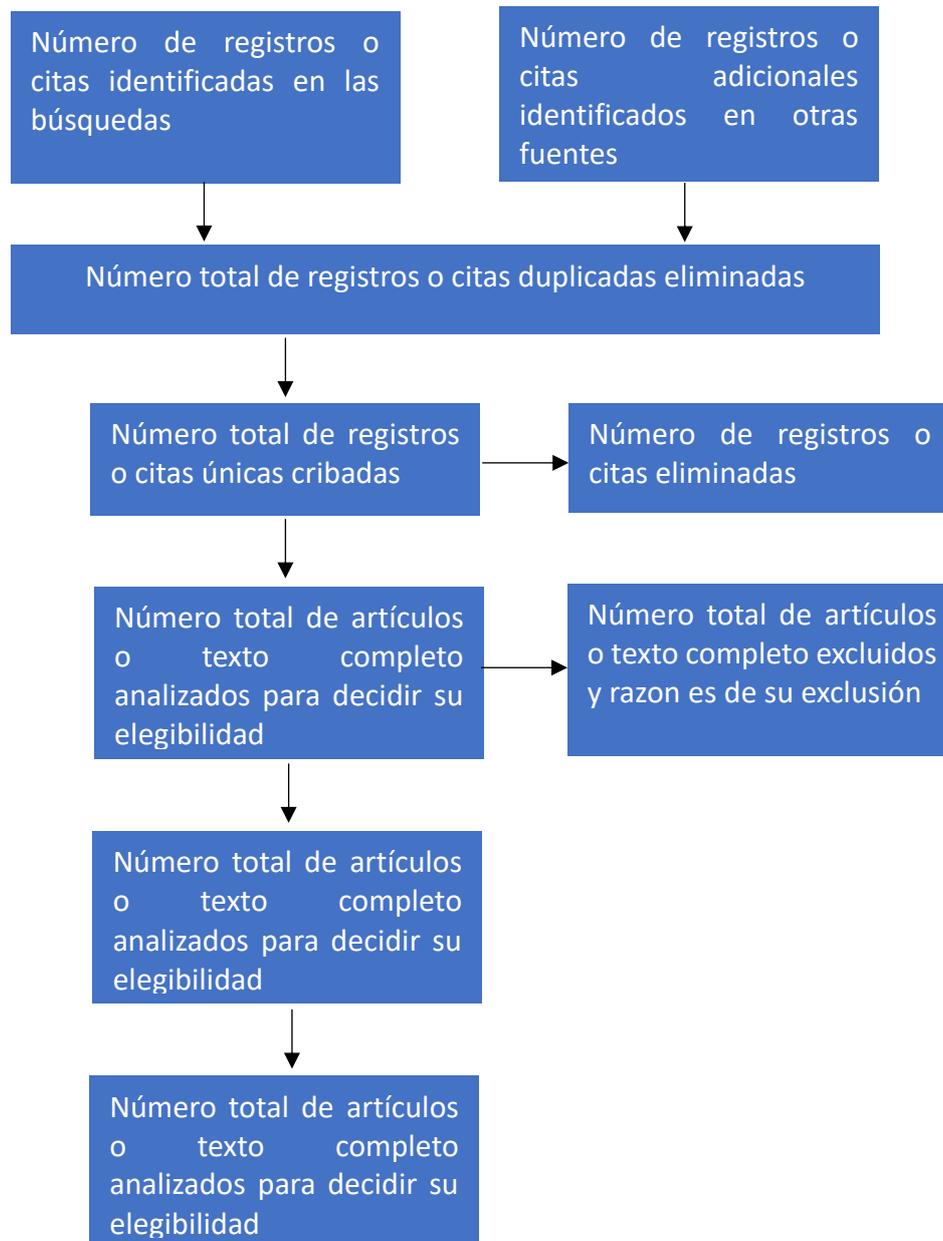


Figura 2. Diagrama PRISMA y fases de la revisión sistemática (Fuente: Pardal-Refoyo, 2020)

4.5.2. Análisis Bibliométrico

El análisis bibliométrico es una metodología de investigación que utiliza técnicas cuantitativas para evaluar y analizar la producción, distribución y uso de la información en documentos científicos y académicos. Se basa en la recopilación y el análisis de datos bibliográficos, como citas, autores, revistas y palabras clave, con el objetivo de proporcionar

información cuantitativa sobre patrones y tendencias en la literatura científica. Dentro de las herramientas que se puede utilizar para dicho análisis, se destacan las siguientes:

- **CiteSpace:** es una herramienta diseñada para la preparación de revisiones sistemáticas o metanálisis. Permite realizar un análisis visual de hitos, caminos críticos y tendencias emergentes en un campo de investigación, basado en publicaciones académicas y literatura científica provenientes de bases de datos como Web of Science, Scopus, Dimensions, PubMed, y CNKI, entre otras principales.

Permite medir la relevancia de un artículo, autor, revista u otros parámetros medibles de la literatura científica en análisis. (como: instituciones, países, palabras clave) a través de indicadores como el factor de impacto (Chen, 2022).

- **VOSviewer:** básicamente se puede utilizar para construir redes de publicaciones científicas, revistas científicas, investigadores, organizaciones de investigación, países, palabras clave o términos. Los elementos de estas redes se pueden conectar mediante enlaces de coautoría, coocurrencia, cita, acoplamiento bibliográfico o cocitación.

Para construir una red, se pueden proporcionar archivos de bases de datos bibliográficas (es decir, archivos Web of Science, Scopus, Dimensions, Lens y PubMed) y archivos de administrador de referencias (es decir, archivos RIS, EndNote y RefWorks) como entrada a VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2023).

5. Metodología

La presente metodología comprende tres secciones, 1) selección de indicadores ecológicos a nivel espacial, 2) la validación de los indicadores, y 3) la aplicación de los indicadores en el área de estudio. En la Figura 3, se describe un flujograma de trabajo donde se describen las actividades principales desarrollados en el presente estudio.

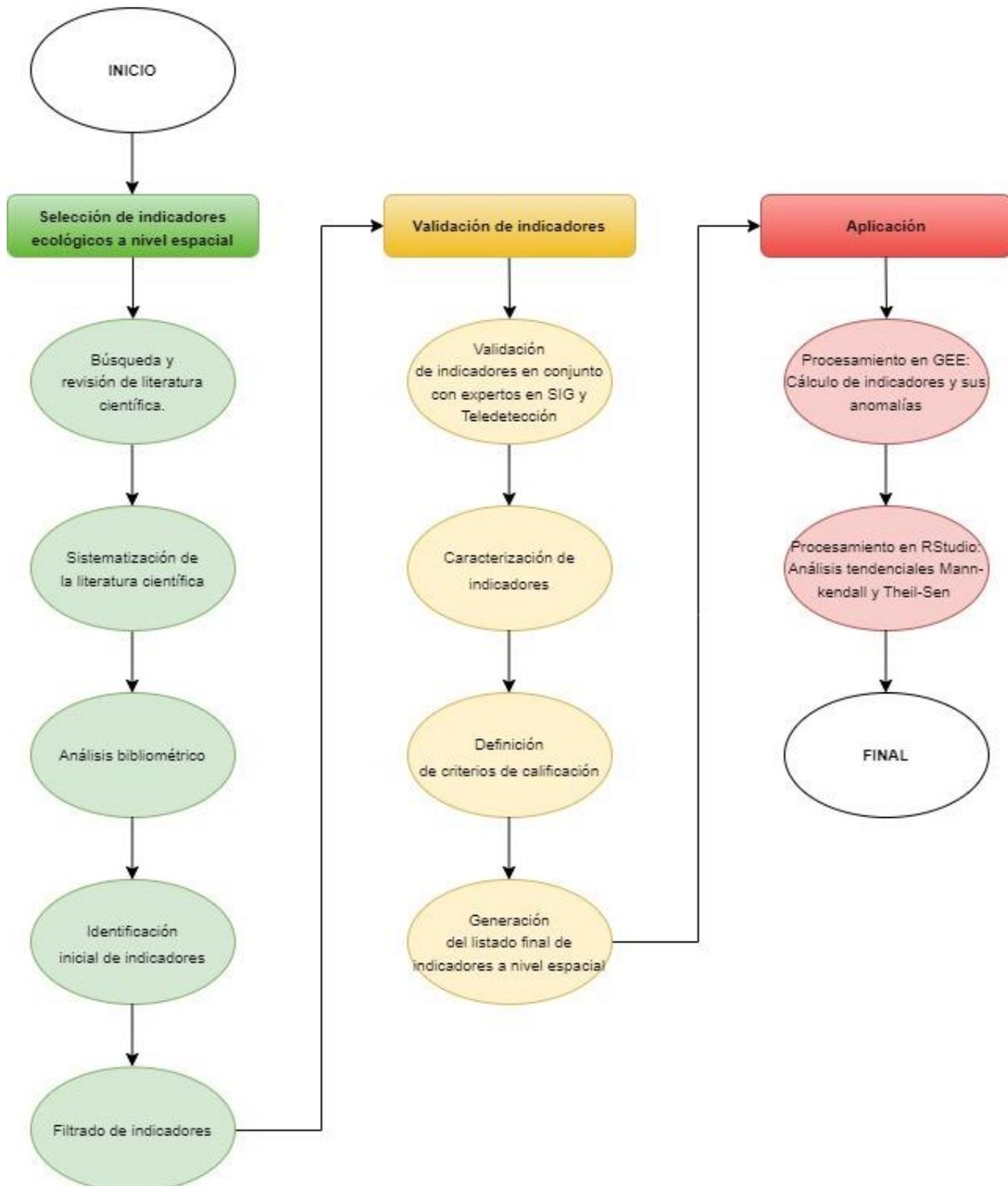


Figura 3. Procedimiento del proceso de sistematización, validación y aplicación de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de la restauración.

5.1. Selección de indicadores ecológicos a nivel espacial

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica, enfocada en identificar los indicadores ecológicos espaciales más adecuados para monitorear la restauración de paisajes. Este proceso incluyó la búsqueda de literatura en la base de datos Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>), utilizando términos clave como ecological restoration, restoration ecology, landscape restoration, natural regeneration, secondary forest, second growth forest, spatial indicator, spatial monitoring, remote sensing y spatial metric. La metodología se basó en una adaptación del protocolo PRISMA.

La búsqueda se centró en documentos publicados entre los años 2000 y 2023, y abarcó países ubicados en los trópicos de América del Sur, además de México y Costa Rica en Norte y Centroamérica, regiones reconocidas por su contribución destacada a la investigación científica. La ecuación de búsqueda aplicada fue la siguiente:

```
TITLE-ABS-KEY ( "South America" OR "Ecuador*" OR "Peru*" OR "Colombia*" OR "Venezuela*" OR "Brazil*" OR "Chile*" OR "Argentina*" OR "Bolivia*" OR "Mexico*" OR "Costa Rica*" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "ecological restoration" OR "restoration ecology" OR "landscape restoration" OR "natural regeneration" OR "secondary forest" OR "second growth forest" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "spatial indicator*" OR "spatial monitoring" OR "remote sensing" OR "spatial metric*" ) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2024 AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE , "Spanish" ) ).
```

Los resultados de la búsqueda se basaron según criterios de relevancia de la investigación y el enfoque geográfico. Se construyó una matriz para registrar información detallada de cada publicación científica, incluyendo indicadores utilizados, métodos de medición, cuyo modelo se puede observar en el Anexo 1. Finalmente, se realizó un listado de indicadores espectrales utilizados en la literatura científica seleccionada y se organizó los indicadores en una tabla para facilitar la revisión y análisis para su validación.

5.1.1. Análisis bibliométrico de la literatura científica

Para el análisis de la literatura científica, se emplearon las herramientas CiteSpace y VOSviewer, que utilizan información estadística de la base de datos de buscadores de literatura científica, con la finalidad de evaluar la influencia y relevancia de literatura científica, para obtener un análisis del dominio de conocimiento de la literatura.

5.1.1.1. Análisis con CiteSpace

El análisis con CiteSpace (software de paga para análisis bibliométrico y cuantitativo) se realizó por los siguientes nodos: países, documentos y revistas. El tamaño de los nodos refleja la frecuencia de referencias u ocurrencias de datos relevantes, las líneas indican la relación entre los nodos, y el grosor de las líneas entre nodos refleja la fuerza de los enlaces entre los datos (Zhao, 2021).

Posteriormente, se realizó la configuración del clúster (forma de agrupar la información) la cual se lo realizó con la opción palabras claves, ya que esta muestra una mejor forma de visualizar los datos obtenidos. Con esto, se obtuvo el grado de enlaces de cocitación, la densidad de red, el valor significativo de la modularización de la red de clústers, el valor de homogeneidad de las redes y el valor de centralidad de los nodos con los enlaces entre cada uno de ellos (Figura 4).

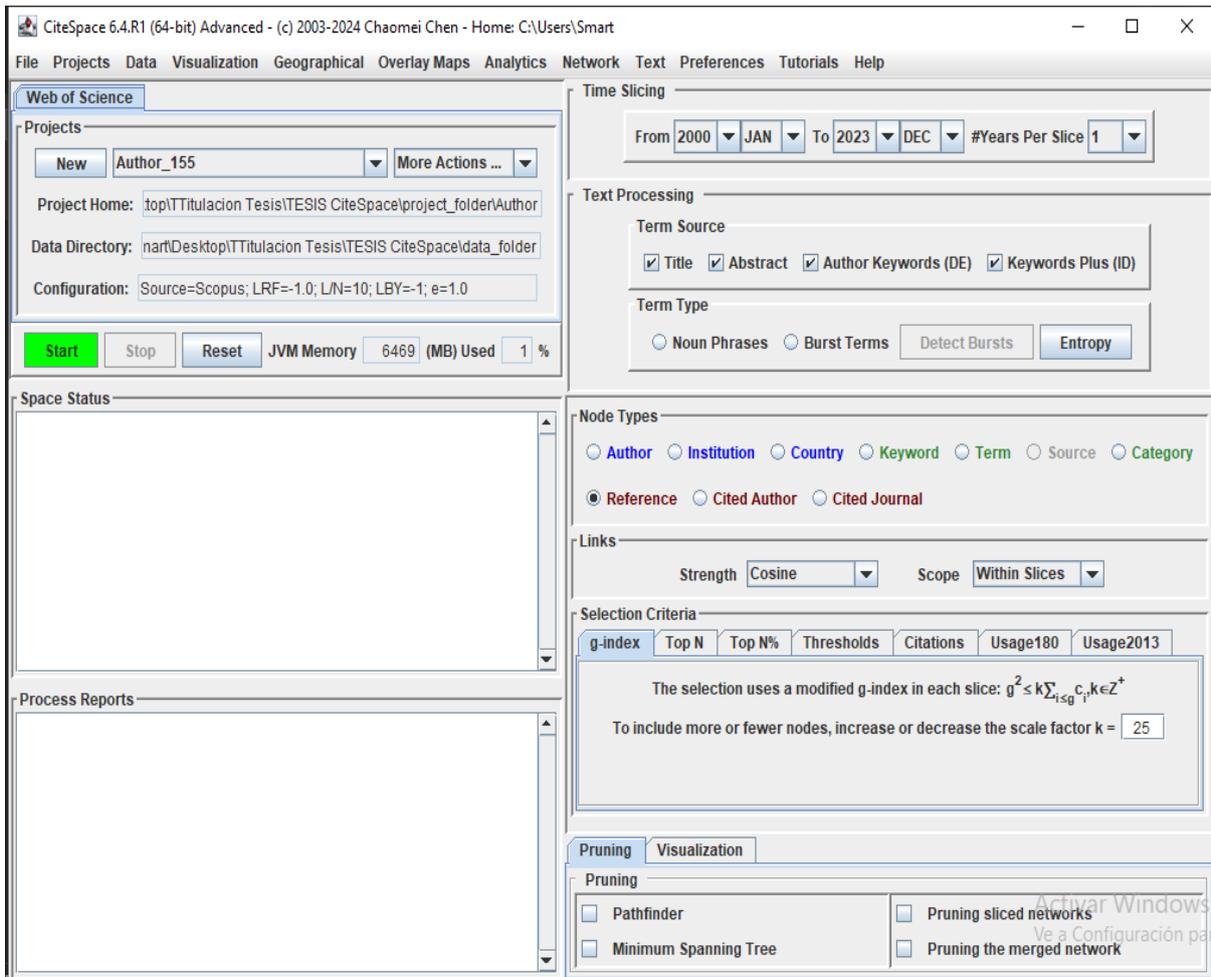


Figura 4. Interfaz de Citespace

5.1.1.2. Análisis con VOSViewer

El programa VOSviewer (software libre para análisis bibliométrico y cuantitativo), es una herramienta especializada para la creación de mapas de ciencia a partir de bases de datos bibliográficas. Para este análisis, se seleccionaron como variables de observación las palabras clave de los artículos de la base de datos Scopus, esto se realizó para analizar la literatura científica relacionada con un conjunto específico de términos. En donde la medida principal utilizada fue la coocurrencia de las palabras claves, la cual permite evaluar la frecuencia de los términos que aparecen en los mismos documentos, reflejando la similitud y la relación entre ellos (Van Eck y Waltman, 2023).

VOSviewer genera representaciones visuales en forma de mapas de ciencia, que son diagramas que muestran cómo se agrupan los términos más relevantes en una red, destacando los nodos (palabras clave) y las conexiones entre ellos. Lo que facilita la identificación de los temas y tendencias predominantes en un campo de investigación, así como los vínculos entre conceptos clave. A través de la visualización de los enlaces que unen los nodos, se pueden detectar patrones de coocurrencia y, de este modo, identificar los temas más influyentes y las relaciones entre diferentes áreas de estudio (Van Eck y Waltman, 2023).

5.1.2. Identificación inicial de indicadores

Una vez realizada la revisión sistemática y el análisis bibliométrico de la literatura científica se procedió a obtener el listado preliminar de indicadores identificados. El listado se refiere a todos los indicadores que se hayan identificado, sin importar frecuencias y similitudes entre nombres.

5.1.3. Filtrado de indicadores

Para el desarrollo del proceso de filtrado de los indicadores identificados durante la revisión sistemática de la literatura científica, se aplicó un filtro de frecuencias, la estandarización de nombres y definiciones (Tabla 2).

Tabla 2. Filtros de información para indicadores

Filtros de información	Descripción
Número inicial	Número total de indicadores identificados en la literatura científica sistematizada
Filtrado de frecuencias	Frecuencia del número de indicadores que se repiten de forma textual
Filtrado de estandarización de nombres y definiciones	Revisión de indicadores para estandarización de nombres y definiciones. A la par descarte de indicadores que no

Filtros de información	Descripción
Número final de indicadores	hacen referencia al tema espacial (solamente se tomaron en cuenta índices espectrales) Número total de indicadores que fueron caracterizados a detalle antes de su validación

5.2. Proceso de validación de indicadores ecológicos

5.2.1. Caracterización de indicadores

De acuerdo con Porcel-Rodríguez (2017), el proceso de caracterización de indicadores, es la forma adecuada para ordenar y analizar de cada uno de estos. Para ello, se han tomado en consideración los siguientes aspectos: a) abreviatura; b) nombre del indicador (español); c) definición; d) aplicación general o específica; e) formulación de cálculo; f) disponibilidad de datos para su cálculo; g) tipo de resultados; h) forma de representación; i) escala de aplicación del indicador; j) periodicidad en la aplicación; k) fuente del indicador.

5.2.2. Definición de criterios de calificación

Para calificar cada uno de los criterios, se utilizó una escala modificada del modelo de Likert, que asigna puntuaciones de 1 a 5 (Gante et al., 2020). Los valores de esta escala se muestran en la Tabla 3. La definición de criterios de calificación, así como la calificación se realizó con base en la validación de expertos en SIG y teledetección del Centro de Investigaciones tropicales del Ambiente y Biodiversidad (CITIAB) y en la experiencia propia de la presente investigación.

Se definieron 13 criterios de calificación, los cuales fueron utilizados para priorizar y seleccionar los indicadores (Tabla 3).

Tabla 3. Rangos para los criterios de calificación

ID	Criterios	Descripción	Rangos
A	Frecuencia normalizada	Frecuencia de aparición de cada indicador en la literatura científica. Se calcula multiplicando la frecuencia de cada indicador por 5 (el valor máximo del rango) y luego dividiéndola para 31, que corresponde con el valor más frecuente del indicador	De 1 a 5 según la frecuencia de aparición del indicador en la literatura científica revisada, donde 5 es el valor óptimo.
B	Requerimiento de datos de campo	Necesidad de capturar datos de campo (datos dasométricos, medidores de reflectancia, lidar terrestre, etc.) para poder calcular el indicador	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy alto

ID	Criterios	Descripción	Rangos
C	Requerimiento de información digital adicional	Necesidad de obtener datos digitales adicionales a las imágenes satelitales para calcular el indicador	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy alto
D	Imágenes gratuitas para el cálculo del índice espectral	Disponibilidad de colecciones de imágenes satelitales	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy alto
E	Información del índice espectral	Disponibilidad de datos ya procesados del índice espectral	5 = Muy alto 4 = Alto 3 = Medio 2 = Bajo 1 = Muy Bajo
F	Resolución espacial	Disponibilidad de información con alta, media o baja resolución espacial (tamaño del pixel en metros).	5 = Muy alto (10 - 30) 4 = Alto (31 – 60) 3 = Medio (61 – 100) 2 = Bajo (101 – 250) 1 = Muy Bajo (251 en adelante)
G	Resolución temporal	Tiempo que tarda el satélite en obtener dos imágenes del mismo sitio.	5 = Muy alto (1 - 3 días) 4 = Alto (4 - 6 días) 3 = Medio (7 - 9 días) 2 = Bajo (10 - 12 días) 1 = Muy Bajo (de 13 días en adelante)
H	Vacíos espaciales y temporales de información (Gaps)	Vacíos de información espacial y temporal. Depende del tipo de imágenes con las que se trabaja.	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy Alto
I	Requerimiento económico de hardware	Se refiere al costo del hardware necesario para procesar los indicadores, esto es inversamente proporcional al tiempo de procesamiento	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy alto
J	Requerimiento técnico del personal	La capacidad técnica que debe tener el personal que realiza el procesamiento	5 = Muy bajo 4 = Bajo 3 = Medio 2 = Alto 1 = Muy alto
K	Enfoque en la evaluación de la cantidad de vegetación	Si el indicador tiende a ser más utilizado para identificación de la cantidad de la vegetación	5 = Muy alto 4 = Alto 3 = Medio 2 = Bajo 1 = Muy Bajo
L	Enfoque en la evaluación de la salud de la vegetación	Si en indicador se utiliza para evaluar es estado de la vegetación	5 = Muy alto 4 = Alto 3 = Medio

ID	Criterios	Descripción	Rangos
			2 = Bajo 1 = Muy Bajo
M	Enfoque en la distinción tipos los de vegetación	Si el indicador es utilizado para poder identificar distintos tipos o estratos de vegetación	5 = Muy alto 4 = Alto 3 = Medio 2 = Bajo 1 = Muy Bajo

Una vez obtenidos los promedios de los indicadores, estos fueron categorizados en función de su aplicabilidad (Tabla 4).

Tabla 4. Nivel de aplicabilidad de indicadores

Categoría	Media de rangos	Nivel de aplicación
1	< 1	Muy baja
2	< 2	Baja
3	< 3	Media
4	< 4	Alta
5	= > 4	Muy alta

5.3. Procesamiento de aplicación de indicadores ecológicos

Después de calificar y categorizar los indicadores, se seleccionaron aquellos de categoría 5 (muy alta) para su aplicación en el área de estudio designada para la aplicación de indicadores.

5.3.1. Descripción del área de estudio para la aplicación de indicadores

El presente proyecto de investigación se desarrolló en cantón Loja, el cual posee una superficie de 1 892,23 Km², su altitud media es de 2100 m s.n.m. y un rango altitudinal entre los 1200 m s.n.m. a 3800 m s.n.m. Posee un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo con una temperatura media de 15 °C; la precipitación anual es de 900 mm con una variación entre los 2000 mm (El Cisne) y los 500 mm (Taquil), la época de precipitación inicia en el mes de septiembre y se extiende hasta el mes de mayo (GAD Municipal de Loja, 2021b).

El cantón Loja se encuentra cubierto en un 66,9 % (1 265,83 Km²), por cobertura vegetal natural; mientras que, el área antropizada (asentamientos humanos, actividades productivas, cambios de uso, etc.) ocupa el 33,10 % (626,40 ha) (IEE y MAGAP, 2013).

A nivel cantonal Loja dedica 447,48 km², equivalente al 23,6 % de su territorio, a actividades pecuarias. La mayor parte de este espacio se destina al cultivo de especies forrajeras utilizadas para la alimentación de ganado bovino y equino. Entre las especies de pastos más comunes se encuentran el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y el trébol (*Trifolium*

sp.), entre otras. Estas actividades predominan en la parte norte del cantón, especialmente en las parroquias de San Lucas, Gualiel y Santiago, así como en las zonas periurbanas de la ciudad de Loja. (GAD Municipal de Loja, 2021a).

Loja cuenta con un área protegida de suma importancia a nivel nacional como es El Parque Nacional Podocarpus; 11 bosques protectores; y dos áreas mancomunadas de manejo ambiental: la Reserva de Biosfera Podocarpus - El Cóndor y el Corredor de Conectividad Sangay - Podocarpus (CCSP) (GAD Municipal de Loja, 2021a). A nivel cantonal, se llevan a cabo acciones de conservación, como las Áreas de Conservación Municipal y Uso Sostenible (ACMUS), que son una figura de conservación destinada a preservar el estado natural de los bosques y páramos, así como a recuperar la funcionalidad ecosistémica en sitios con alta intervención antrópica. En el año 2000 el GAD expidió la ordenanza de creación y gestión de las ACMUS, donde se singularizaron las áreas a proteger. Hasta el año 2023, Loja suma 74 mil hectáreas en áreas de conservación, de las cuales 29 mil has son Áreas de Interés Hídrico (AIH) (NCI, 2023).

El área de aplicación forma parte del Proyecto de Cooperación MAATE-UNL, denominado Transferencia, Cooperación y Administración de Recursos Financieros para la “Implementación de 500 Hectáreas de Restauración Forestal en Territorios Priorizados de la Provincia de Loja”. Este proyecto, iniciado en 2023 es ejecutado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y la Empresa Pública La Nacional de Loja-EP (MAATE, 2022; UNL, 2023). De las 169 parcelas de intervención en el cantón Loja, se seleccionaron puntualmente cinco, para la aplicación de indicadores, (Tabla 5) con base en dos criterios: (1) contar con más de 15 ha y (2) haber recibido acciones previas de conservación y/o restauración durante al menos 10 años. Las ubicaciones y detalles de las áreas evaluadas se muestran en la Figura 5.

Tabla 5. Prácticas de restauración en las cinco parcelas de aplicación.

Parroquia	Sector / Área	Beneficiario	Área (ha)	Modalidad	Práctica	Actividad
San Lucas	Akakana	Comuna Akakana	92,99	Pasiva	Regeneración natural asistida	Regeneración natural asistida
Loja	La Argelia	Universidad Nacional de Loja	60,34	Pasiva	Regeneración natural asistida	Regeneración natural asistida
Loja	Masaca	Valverde Pineda José Manuel	37,54	Activa	Restauración sistemas productivos	Enriquecimiento de sistemas silvopastoriles

Parroquia	Sector / Área	Beneficiario	Área (ha)	Modalidad	Práctica	Actividad
Taquil	La Aguangora	Quichimbo Guamán Milton Witd Lozano	22,15	Activa	Restauración sistemas productivos	Enriquecimiento de sistemas silvopastoriles
San Lucas	Guaguelpamba	Medina Lauro Vicente	16,65	Activa	Restauración sistemas productivos	Enriquecimiento de sistemas silvopastoriles

En las áreas La Aguangora y Guaguelpamba, los propietarios abandonaron las actividades pecuarias hace más de 10 años, favoreciendo la conservación y restauración. En las otras tres áreas, los procesos de conservación han superado los 20 años. Masaca siguió un proceso similar, con el abandono de actividades pecuarias. En Akakana, la comunidad impulsó la conservación debido a su importancia como fuente de agua para varias comunidades y su valor cultural y religioso. Finalmente, el área La Argelia, ubicada en el Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, se destaca como centro de investigación universitaria, con acciones de conservación y restauración activas y pasivas, a pesar de sufrir incendios forestales esporádicos.

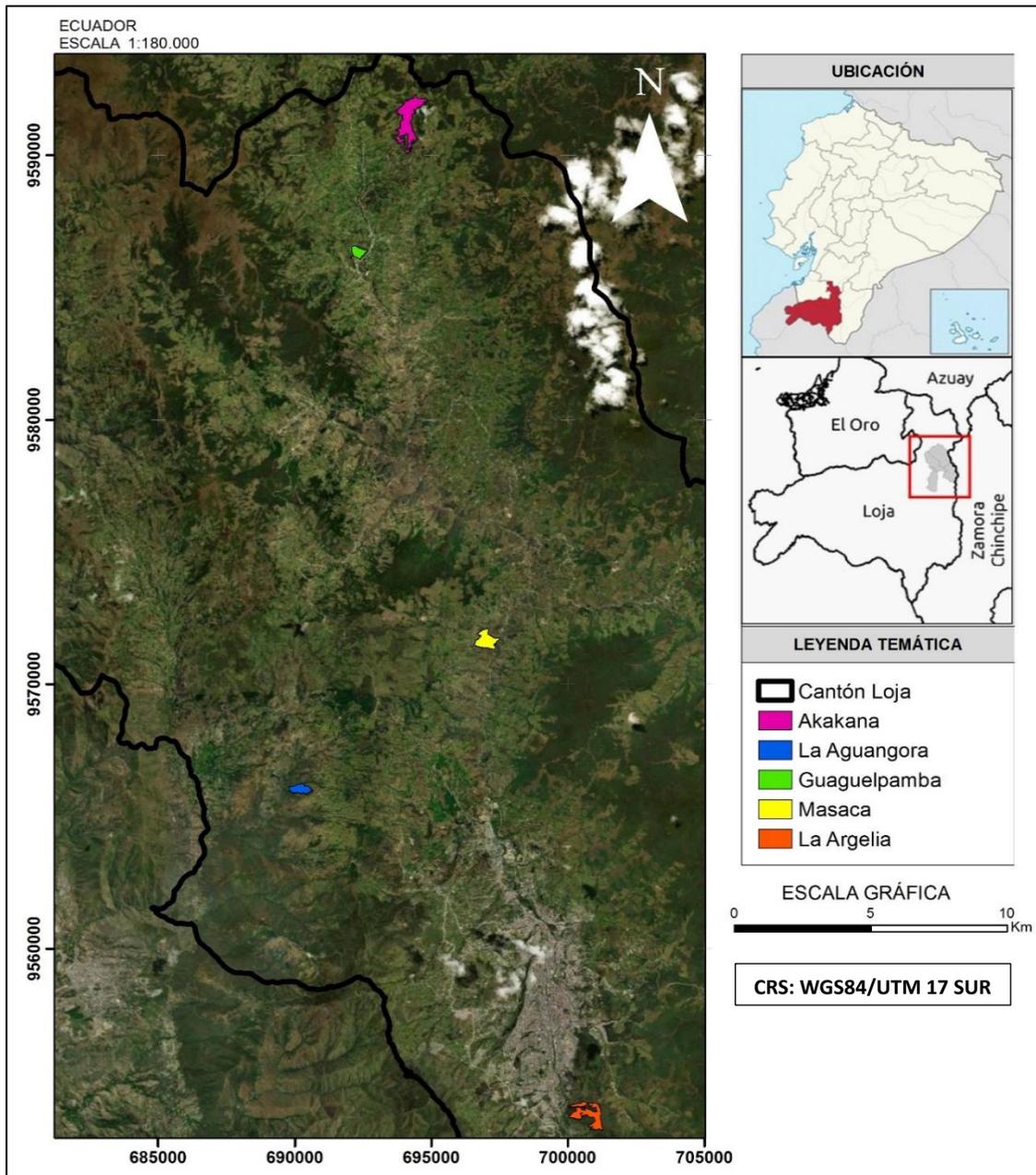


Figura 5. Localización de las parcelas de aplicación en el área de estudio

5.3.2. Procesamiento con Google Earth Engine

El procesamiento de la información se llevó a cabo en Google Earth Engine (GEE), una plataforma de Google que permite realizar análisis geoespaciales a gran escala utilizando bases de datos con millones de registros. Sus principales objetivos son reducir el tiempo de preprocesamiento de datos, facilitar el análisis de información geoespacial y gestión de la big data (Solórzano Villegas y Perilla Suárez, 2022; Velastegui-Montoya et al., 2023). Se desarrolló un script (Anexo 2) en GEE para monitorear la restauración de paisajes analizando los cambios

anuales en los indicadores mejor puntuados en el proceso de validación. El script se estructuró de los siguientes componentes:

5.3.2.1. Selección de colección de imágenes satelitales (Landsat)

Se optó por las imágenes de las misiones USGS Landsat 5, 7, 8 y 9 (Level 2, Collection 2, Tier 1). Estos satélites proporcionan datos de descarga gratuita, con un intervalo temporal de 16 días y una resolución espacial de 30 metros en las bandas del espectro visible e infrarrojas. Estas características hacen de Landsat una opción ideal y ampliamente utilizada en el campo de la teledetección (Roy et al., 2014)

5.3.2.2. Generación de mosaicos anuales sin nubes

Para cada año, dentro del periodo de estudio (1996 -2023), se filtraron las imágenes correspondientes a las cinco parcelas de interés y se creó un mosaico anual usando la mediana de las imágenes, para cada una de las áreas. Estas imágenes se escalaron usando una función de corrección para obtener valores de reflectancia ajustados. Se aplicaron máscaras para eliminar nubes y sombras, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Selección de la banda de calidad: se creó una función para enmascaramiento de nubes y sombras de cada colección, donde se seleccionó la banda de calidad de píxeles (QA_PIXEL) de la imagen, que contiene información sobre la presencia de nubes y otros factores de calidad.
- Aplicación de máscara de nubes: mediante operaciones de bits, se verificó en cada imagen la ausencia de nubes y sombras de nubes. Se realizó la operación *bitwiseAnd* en posiciones específicas (distintas para cada sensor) para identificar píxeles libres de nubes.
- Actualización de máscara: la función aplicó esta máscara a la imagen, manteniendo solo los píxeles que cumplen con los criterios de calidad, es decir, aquellos sin nubes ni sombras.

5.3.2.3. Corrección del bandeo en las imágenes Landsat 7

En GEE, para corregir el error de bandeo de las imágenes Landsat 7, donde se generan vacíos de información en forma de bandas, se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

- Identificación de píxeles faltantes: se creó la función *corregirBandeadoL7*, que toma una imagen como entrada y primero crea una máscara (mask) que identifica los píxeles con valores faltantes o corruptos (sin datos) debido al bandeo.
- Corrección mediante dilatación morfológica: utilizando la operación *focal_mean*, la función aplica un filtro de media focal de 4 píxeles en forma cuadrada para calcular valores aproximados en los píxeles sin datos, rellenando así los espacios vacíos. La máscara se actualiza para aplicar este cálculo solo en los píxeles donde falta información.
- Combinación de imágenes: finalmente, la imagen original se combina con la imagen corregida para reemplazar los píxeles faltantes con los valores corregidos, conservando los datos originales donde no haya bandeo.

5.3.2.4. Cálculo de indicadores (índices espectrales)

En el script implementado en Google Earth Engine (GEE), se desarrollaron funciones para calcular los indicadores clasificados como "muy aplicables" en la Tabla 4. Estos cálculos se realizaron para el periodo comprendido entre 1996 y 2023 en las cinco parcelas ubicadas en áreas de proyectos de restauración adjudicados a la Universidad Nacional de Loja. Los indicadores fueron seleccionados de acuerdo con las necesidades específicas del análisis.

Dependiendo del indicador seleccionado (NDVI, AVI o EVI), se utilizaron fórmulas estándar que combinan las bandas nir (infrarrojo cercano), red (rojo) y blue (azul), junto con los parámetros y constantes pertinentes (como G, C1, C2 y L en el caso de EVI).

El índice calculado se almacenó como una nueva banda denominada "índice". Posteriormente, las imágenes correspondientes al índice de cada año fueron añadidas al mapa para su visualización. Además, se generó un gráfico de la serie temporal anual que muestra el promedio del índice calculado en el área de interés, facilitando así el análisis de su comportamiento a lo largo del tiempo

5.3.2.5. Cálculo de anomalías

Se calcularon las anomalías anuales de los indicadores seleccionados en sus formas absoluta, relativa y como desviaciones estándar (para el mismo periodo que el cálculo de indicadores). Para ello, se tomaron como referencia la media y la desviación estándar anual de cada indicador.

5.3.2.6. Exportación y visualización de resultados

Se exportaron los resultados en forma de imágenes multibanda, integrando tanto la información de los indicadores como sus anomalías, junto con estadísticas resumidas en formato CSV. Asimismo, se generaron gráficos en la consola de GEE para visualizar las tendencias temporales y se desarrolló un panel interactivo que facilita el análisis detallado de los valores del índice a nivel de píxel.

5.3.2.7. Análisis de series temporales de indicadores en el software RStudio

Se desarrolló un script en el lenguaje de programación R versión 4.3.1 (Anexo 3), para realizar un análisis de las tendencias de las series temporales de los índices espectrales, mediante la prueba de Mann-Kendall (MK), una prueba no paramétrica eficaz para evaluar series temporales (Yusuf et al., 2018). Este análisis se aplicó a cada uno de los indicadores seleccionados, generando datos y gráficos de tendencias para las cinco áreas de estudio. Esto permitió evaluar la dirección de las tendencias y determinar si eran estadísticamente significativas.

Para la determinación de la magnitud de la pendiente se utilizó el estimador Theil-Sen (TS) que en combinación con la prueba de MK permite identificar la dirección y significancia de las tendencias en datos de series temporales a largo plazo. El estimador de TS es particularmente útil debido a su robustez frente a valores atípicos, proporcionando una estimación confiable de la pendiente en la tendencia (Eskandari Damaneh et al., 2021; Mostafavi et al., 2024).

6. Resultados

6.1. Indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes

6.1.1. Sistematización de la literatura científica

Mediante la aplicación de la ecuación de búsqueda en la base de datos Scopus, se identificaron inicialmente 155 publicaciones científicas (Anexo 4). Posteriormente, tras un proceso detallado de análisis y exclusión, se seleccionaron 118 publicaciones que cumplieron con los criterios establecidos para el estudio, constituyendo el corpus del análisis bibliométrico.

La Figura 6 presenta el análisis sistemático de la literatura científica. Durante la fase de filtrado y revisión, se descartaron 37 publicaciones que no cumplían con los requisitos estipulados en los objetivos de la investigación. Finalmente, se realizó un análisis exhaustivo de las 118 publicaciones seleccionadas, cuyos datos fueron utilizados para elaborar una síntesis de los hallazgos de la investigación.

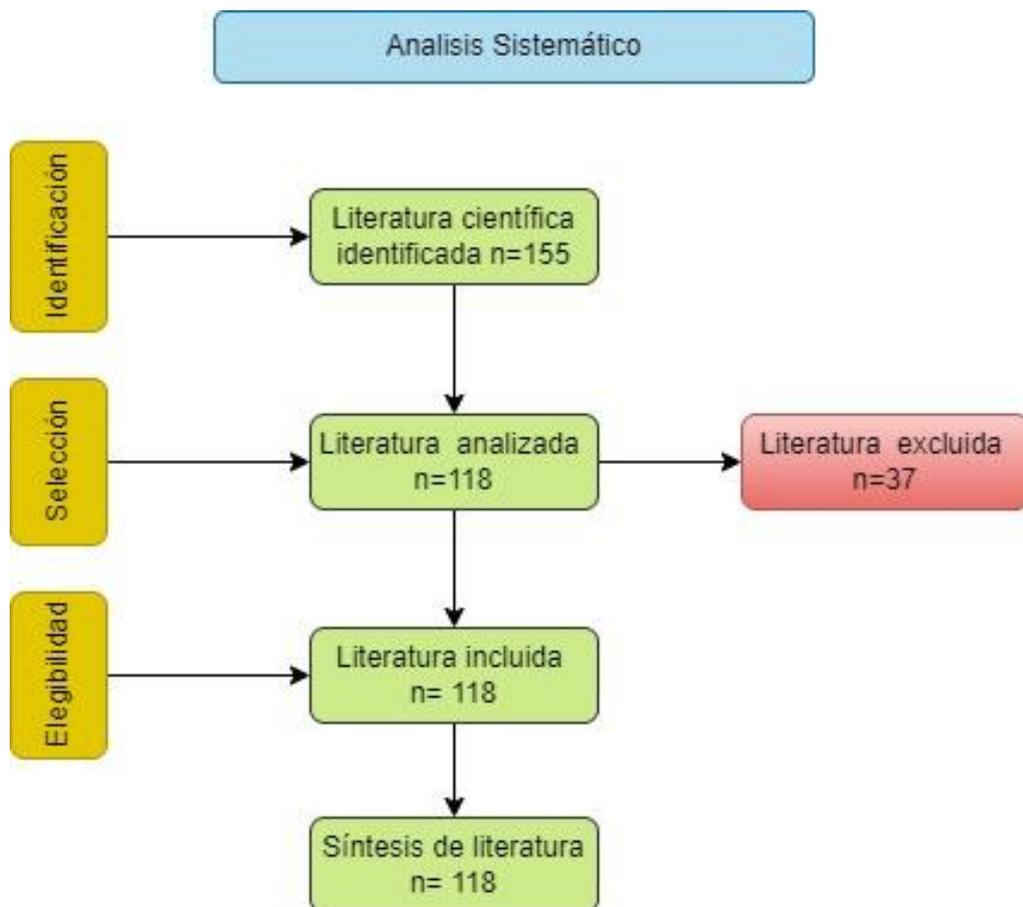


Figura 6. Análisis sistemático de literatura científica

Las publicaciones científicas excluidas fueron descartadas por las siguientes razones: en primer lugar, porque no pertenecían al área geográfica de investigación de este estudio, es decir, no se relacionaban con los bosques tropicales o subtropicales, en segundo lugar, se excluyó aquella literatura cuya temática o metodología no se alineaban con los objetivos de la investigación propuestos, y finalmente, se descartó aquella literatura que utilizaban una metodología de revisión sistemática, debido a que este tipo de estudios no eran pertinentes para el enfoque específico de esta investigación.

6.1.2. Análisis bibliométrico

6.1.2.1. Contribuciones de investigaciones por país

De acuerdo a la revisión sistemática planteada, se estableció que las investigaciones hayan sido realizadas a nivel de los trópicos de América. Del total de las publicaciones analizadas, Brasil tiene el mayor porcentaje de investigaciones realizadas con el 29,03% (45 publicaciones) con una marcada diferencia con los demás países de la región, seguido de México, con el 12,90% (20 publicaciones), y, Costa Rica y Ecuador en el tercer y cuarto lugar con el mismo porcentaje 9,03% (14 publicaciones) cada uno, como se aprecia en la Figura 7.

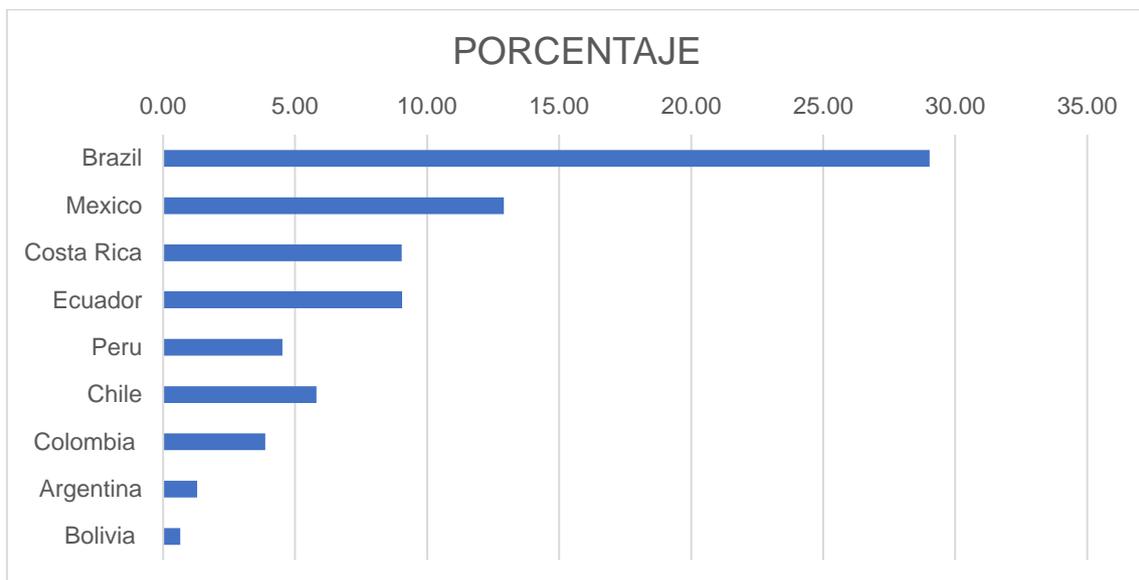


Figura 7. Porcentaje de estudios desarrollados en cada uno de los países de investigación.

6.1.2.2. Contribuciones de citas por países

El análisis bibliométrico realizado en CiteSpace identifica a los países con mayor producción científica sobre temas de restauración y teldetección en los trópicos de América, ordenados por número de publicaciones de manera descendente: Estados Unidos (63 citas),

Brasil (48 citas), México (19 citas), Canadá (16 citas) y Reino Unido (13 citas), entre los más destacados.

En la Figura 8 se observan los clústers y las relaciones que tienen con las citas entre países, en donde se destaca una estrecha relación entre Alemania y Ecuador, lo que sugiere una colaboración significativa entre estos dos países. Además, se observa que EE.UU. y Reino Unido son los principales centros de producción científica a nivel global, mientras que Brasil destaca como el principal contribuyente en la región latinoamericana, con fuertes conexiones con México, Argentina y Ecuador.

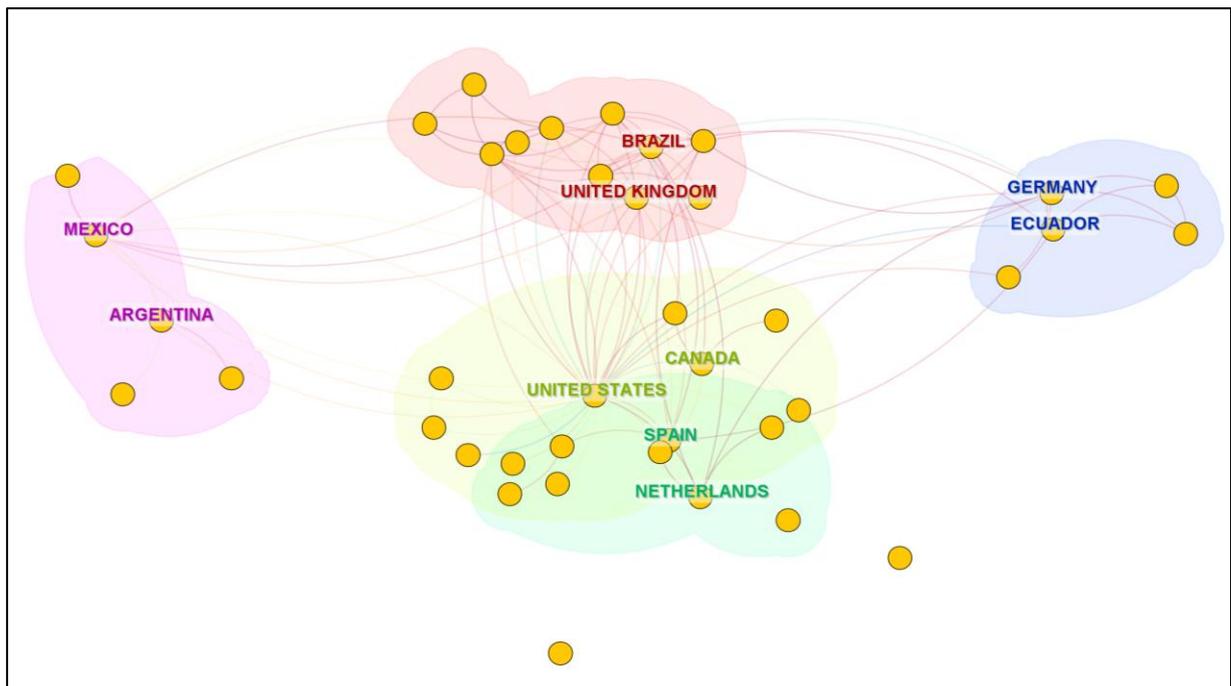


Figura 8. Número de citas por país de publicaciones científicas

Finalmente, es importante especificar que tanto Ecuador como Argentina muestran un crecimiento significativo en la realización de producción científica y colaboración internacional en los últimos años tal como se puede observar en los enlaces de la Figura 8, indicando una tendencia positiva en la investigación en el área de la restauración de paisajes en la región.

6.1.2.3. Análisis por referencia (documentos), CiteSpace

Este análisis toma en consideración la cocitación de los documentos, el cual representa una importancia relativa de cada publicación en el campo de estudio, además un mayor número de cocitaciones indica una mayor influencia y relevancia del documento.

Conforme se puede observar en la Figura 9, se presenta los documentos más citados y sus respectivos clústeres. Destaca el trabajo de Myers N. (2000), "Biodiversity Hotspots For

Conservation Priorities", como el más influyente, siendo citado por 7 autores y ubicado en el clúster 0. Este clúster se centra en la conservación de la biodiversidad y la cobertura forestal.

También se puede determinar otros documentos relevantes en los cuales se incluyen de los autores Skole D. (1993) y Hansen MC. (2013), ambos con 6 cocitaciones y ubicados en los clústeres 3 y 0, respectivamente. Estos trabajos se enfocan en la deforestación y el cambio de cobertura forestal, temas centrales en el campo de estudio (Anexo 5).

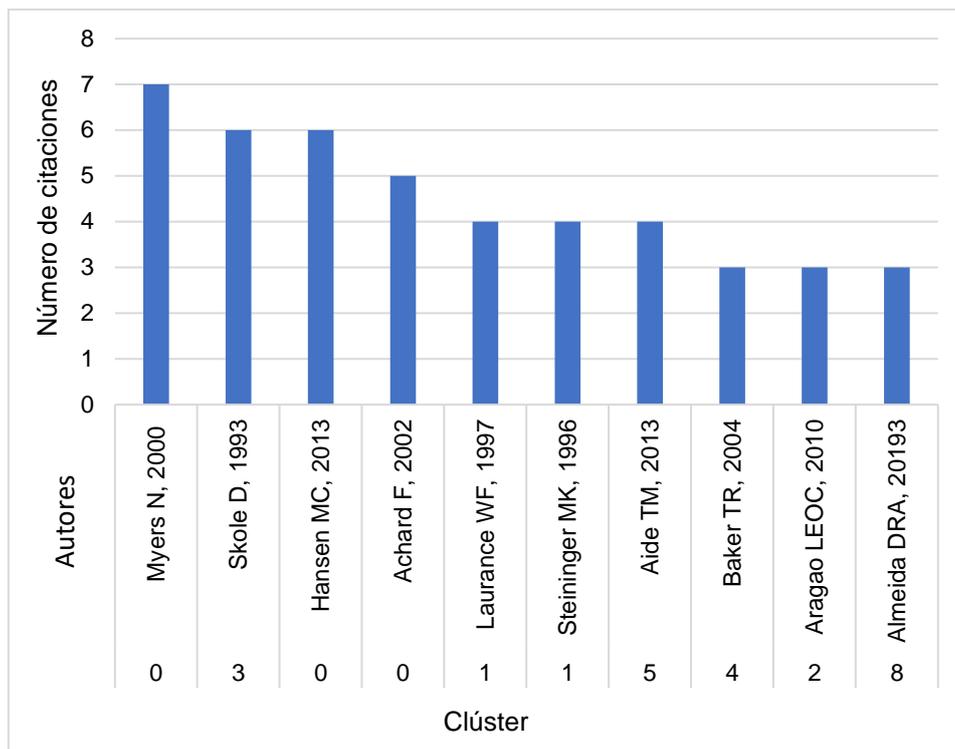


Figura 9. Referencias más citadas de las publicaciones científicas y sus clústers

En la Figura 9, se muestra el clúster con mayor número de documentos cocitados por la literatura científica es el clúster 0 con 18 cocitaciones y la presencia de tres documentos con la mayor cantidad de citas: Myers N. (con 7 cocitaciones), Hansen MC. (con 6 cocitaciones), y Achard F. (con 5 cocitaciones). Esto sugiere que las investigaciones sobre conservación de la biodiversidad, deforestación y cambio de cobertura forestal son áreas de gran interés y relevancia en el área de investigación.

El análisis revela una evolución en las temáticas de investigación. Los documentos más antiguos, como el de Myers N. (2000), se centran en la identificación de hotspots de biodiversidad. Los estudios más recientes, como el de Almeida (2019), exploran el uso de tecnologías avanzadas como el LiDAR para monitorear la vegetación y la restauración de

paisajes, donde se puede observar la evolución de las nuevas tecnologías para el monitoreo de la vegetación y su incremento en las tendencias de investigación.

6.1.2.4. Análisis por journal, CiteSpace

En el análisis del factor de impacto por revistas científicas que representan los documentos con mayor relevancia y las revistas con mayor cantidad de citas en el área de investigación son aquellos que pertenecen a la revista SCIENCE con 77 cocitaciones, BIOTROPICA con 50 cocitaciones y NATURE con 49 cocitaciones, las cuales se encuentran en el clúster número 1, tal como se muestra en la Figura 10.

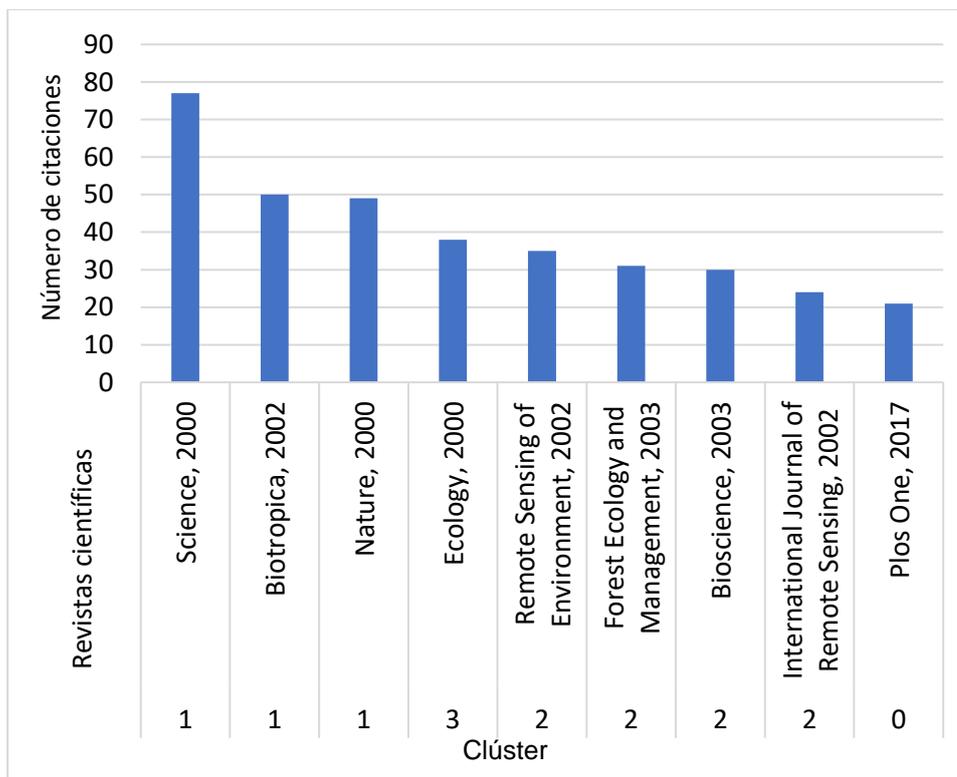


Figura 10. Análisis de citaciones por revista (journal)

En la Figura 10, se puede observar el ranking de las revistas más citadas y sus respectivos clústers, en donde los que forman los clústeres 1, 3, 2, y 0 concentran la mayor parte de las cocitaciones entre revistas (ver Anexo 5), lo que indica una fuerte interconexión temática entre los artículos publicados en ellas.

De la misma manera se puede observar el aporte de las revistas SCIENCE BIOTROPICA y NATURE, evidenciada el número más alto de cocitaciones, Estas revistas albergan investigaciones de vanguardia en áreas como teledetección y gestión forestal, siendo las más relevantes para el estado del arte.

6.1.2.5. Análisis por palabras claves, VOSviewer

En la Figura 11 se muestra la red de citas de palabras clave, conformada por cuatro clústeres. El más destacado es el clúster 4, encabezado por la palabra "remote sensing" (126 ocurrencias) y "forestry" (54 ocurrencias). Cada nodo representa publicaciones relacionadas con palabras clave, cuyo tamaño está determinado por la cantidad de veces que han sido citadas. Por su parte, los clústeres (grupos del mismo color) muestran cómo se agrupan las distintas investigaciones para el análisis de la problemática de estudio.

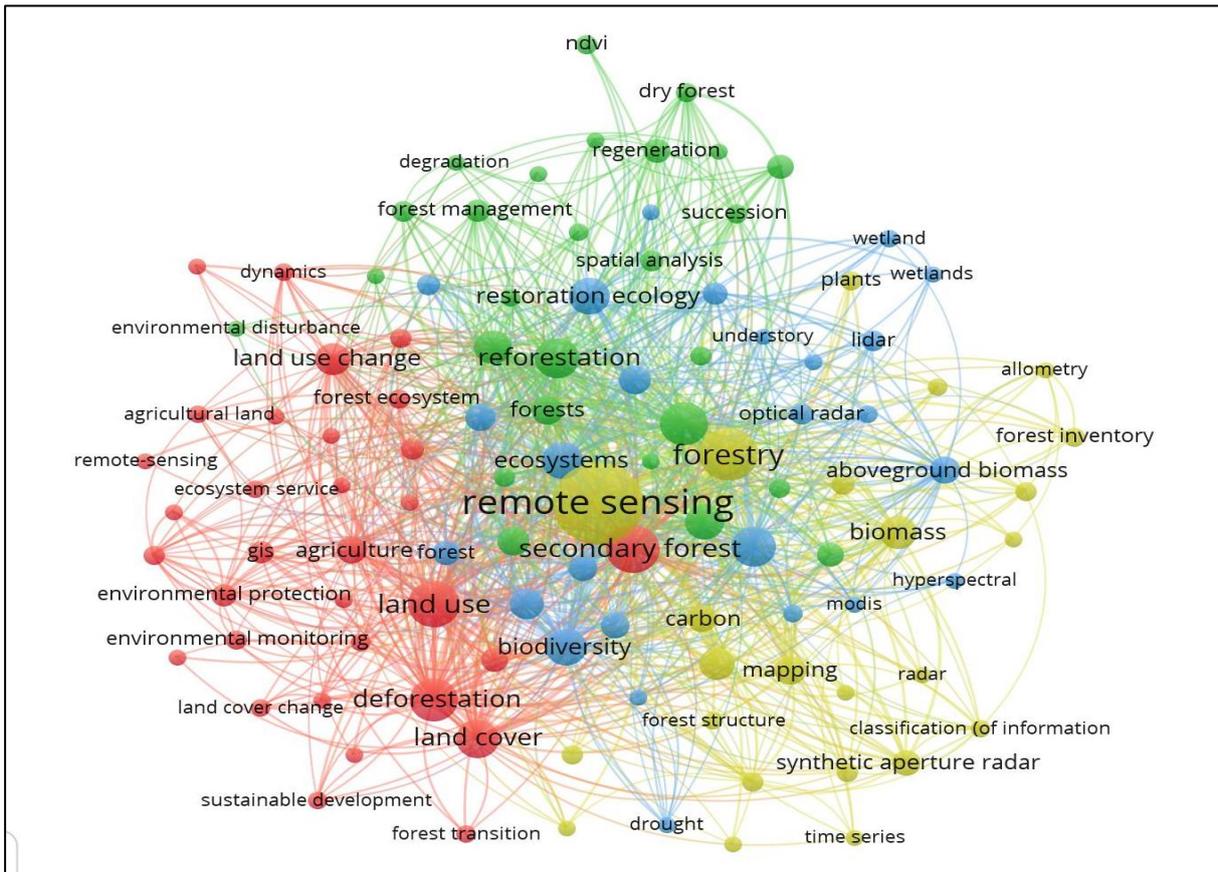


Figura 11. Red de ocurrencias por frecuencia de palabras claves

El clúster 4, dominado por términos como "remote sensing" y "forestry", se centra en el uso de sensores remotos para el estudio de los bosques y la deforestación. Mientras que, el clúster 1, con términos como "secondary forest" (45 ocurrencias) y "land use" (41 ocurrencias), se enfoca en la restauración de bosques secundarios y los cambios en el uso del suelo (Anexo 5).

El término "remote sensing" destaca como el de mayor citación, con 108 enlaces y una fuerte influencia en la comunidad científica. Esto refleja la creciente importancia de las tecnologías de teledetección, como las de mayor incremento para monitorear los cambios en la cobertura terrestre y evaluar la efectividad de las estrategias de restauración. Los resultados

obtenidos subrayan la relevancia de integrar la teledetección en los estudios sobre conservación, ecología y restauración de ecosistemas, lo que permite tener una mejor comprensión de los impactos de las actividades humanas sobre la naturaleza y el desarrollo de estrategias más efectivas para la gestión sostenible de los recursos naturales.

6.1.3. Listado inicial de indicadores identificados

Tras completar la revisión sistemática y el análisis bibliométrico de las 118 publicaciones científicas analizadas, se identificaron 219 indicadores, contabilizados, incluyendo repeticiones.

Después de aplicar los filtros que se visualizan en la Tabla 6, el número de indicadores se redujo de 219 a 19, los cuales fueron caracterizados y luego calificados.

Tabla 6. Filtros de información para indicadores

Filtros de información	Descripción	Número final de indicadores
Número inicial	Número total de indicadores identificados en la literatura científica sistematizada	219
Filtrado de frecuencias	Frecuencia del número de indicadores que se repiten de forma textual	141
Filtrado de estandarización de nombres y definiciones	Revisión de indicadores para estandarización de nombres y definiciones. A la par descarte de indicadores que no hacen referencia al tema espacial (solamente se tomaron en cuenta índices espectrales)	65
Número final de indicadores	Número total de indicadores que fueron caracterizados a detalle antes de su validación	19

6.2. Validación de indicadores a nivel espacial

6.2.1. Listado y caracterización de indicadores

Se han identificado finalmente 19 indicadores espaciales para el monitoreo de la restauración de paisajes, los cuales fueron sometidos posteriormente a calificación y evaluación. En la Tabla 7 se presenta las fichas descriptivas que detallan la caracterización de cada indicador, incluyendo su método de cálculo, aplicaciones y escalas de uso, para facilitar su implementación en distintos niveles de análisis espacial y temporal.

Tabla 7. Caracterización de indicadores espaciales para monitoreo de la restaración

1) Normalized Difference Vegetation Index	
a) Abreviatura	NDVI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

c) Definición	Es un indicador numérico que utiliza las bandas espectrales roja y cercana al infrarrojo. El NDVI está altamente asociado con el contenido de vegetación
d) Aplicación general o específica	Aplicación general para evaluación y monitoreo de la salud de la vegetación en diferentes ecosistemas
e) Formulación de cálculo	$\text{NDVI} = (\text{NIR} + \text{Red}) / (\text{NIR} - \text{Red})$ <p>Dónde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja</p>
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Ampliamente accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. Existen colecciones preprocesadas de NDVI en las plataformas.
g) Tipo de resultados	Los valores oscilan entre -1 y +1. Los valores cercanos a +1 indican una alta densidad de vegetación verde, mientras que valores cercanos a 0 o negativos indican poca o ninguna vegetación.
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Propuesto inicialmente por Rouse et al. (1974). Actualmente, es derivado de imágenes satelitales proporcionadas por agencias espaciales
2) Enhanced Vegetation Index	
a) Abreviatura	EVI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación Mejorado
c) Definición	Sirve cuantificar el verdor de la vegetación. EVI corrige algunas condiciones atmosféricas. Utiliza bandas espectrales del azul, rojo e infrarrojo cercano para proporcionar una evaluación más precisa de la densidad de la vegetación
d) Aplicación general o específica	De aplicación general para el monitoreo y evaluación de su salud de la vegetación. Es particularmente útil en regiones densamente vegetadas y en áreas donde la corrección de efectos atmosféricos es fundamental
e) Formulación de cálculo	$\text{EVI} = G * ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{C1} * \text{Red} - \text{C2} * \text{Blue} + \text{L}))$ <p>Donde: G: Factor de ganancia = 2.5 NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja Blue: Reflectancia en la banda azul C1: Coeficiente de ajuste para la corrección atmosférica, generalmente 6 C2: Coeficiente de ajuste para la corrección atmosférica, generalmente 7.5 L: Factor de corrección del dosel, generalmente 1</p>
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Ampliamente accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. Existen colecciones preprocesadas de EVI directamente en MODIS, en Landsat y Sentinel a través de GEE.
g) Tipo de resultados	Los valores se encuentran entre -1 y +1, donde valores más altos indican una mayor densidad y actividad de la vegetación, especialmente en áreas de alta densidad de biomasa donde el NDVI puede llegar a saturarse.

h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Desarrollado por Huete et al. (1997)
3) Advanced Vegetation Index	
a) Abreviatura	AVI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación Avanzado
c) Definición	Es un indicador numérico, similar al NDVI, utiliza las bandas espectrales roja y cercana al infrarrojo. Se utiliza para monitorear las variaciones de cultivos y bosques a lo largo del tiempo
d) Aplicación general o específica	Aplicación general para evaluación y monitoreo de la vegetación en diferentes ecosistemas. Es útil para identificar cambios sutiles en la densidad de la vegetación
e) Formulación de cálculo	$AVI = \frac{NIR * (1 - Red)}{NIR + Red}$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Valores continuos que pueden ser utilizados para medir la densidad y vigor de la vegetación. Valores más altos indican una mayor biomasa o densidad de vegetación, mientras que valores más bajos sugieren poca o ninguna vegetación. Su escala puede ser variable de acuerdo a la necesidad y tipo de estudio, pero de preferencia se utiliza la escala de NDVI que se encuentra entre valores de -1 +1
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Descrito por DeKa et al. (2013)
4) Wide Dynamic Range Vegetation Index	
a) Abreviatura	WDRVI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio
c) Definición	Es un índice que mejora la sensibilidad del NDVI en áreas de vegetación densa. Presenta un coeficiente de ponderación a la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR), lo que reduce la saturación observada en el NDVI cuando se monitorean áreas con una alta cobertura vegetal
d) Aplicación general o específica	Aplicación general para la evaluación y monitoreo de vegetación, especialmente en ecosistemas o cultivos con alta biomasa, donde el NDVI tiende a saturarse
e) Formulación de cálculo	$WDRVI = \frac{\alpha * NIR - Red}{\alpha * NIR + Red}$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana

	Red: Reflectancia en la banda roja α : puede variar de 0.1 a 0.2
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Al utilizar las mismas bandas que utiliza el NDVI los datos son accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Rango de valores que mejora la sensibilidad en áreas con alta densidad de vegetación en comparación con el NDVI. Valores más altos indican vegetación densa y saludable, mientras que valores más bajos reflejan áreas con menor biomasa o estrés, el rango de valores se basa en los de NDVI de -1 +1
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color. Las áreas con mayor vegetación aparecerán en tonos más verdes, mientras que las zonas con menor vegetación o biomasa aparecerán en tonos más rojos o marrones
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Propuesto por Gitelson (2004)
5) Soil Adjusted Vegetation Index	
a) Abreviatura	SAVI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
c) Definición	es una alternativa al convencional índice NDVI destinado a corregir la influencia ejercida por el suelo durante los estudios de vegetación a través de bandas del espectro electromagnético
d) Aplicación general o específica	Aplicación general en el monitoreo de vegetación en áreas donde el suelo tiene una alta reflectancia o en zonas con baja cobertura vegetal. Es especialmente útil en estudios agrícolas, ecológicos y en ecosistemas áridos o semiáridos. El factor L es el encargado de amortiguar la presencia del suelo a través de valores comprendidos entre 0 (para zonas con gran densidad vegetal) y 1 (para zonas con escasa densidad vegetal)
e) Formulación de cálculo	$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L)$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja L: entre 0 y 1, dependiendo de la densidad vegetal
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Al utilizar las mismas bandas que utiliza el NDVI los datos son accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Los valores oscilan entre -1 y +1. Valores más altos indican una mayor presencia de vegetación y menor interferencia del suelo, mientras que valores bajos sugieren áreas con poca vegetación o mucha exposición del suelo
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color. colores más intensos (generalmente verdes) para representar áreas de alta vegetación, y colores más apagados o marrones para áreas con poca cobertura vegetal y mucho suelo expuesto

i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Desarrollado por Huete (1988) como una mejora sobre el NDVI
6) Structurally Insensitive Pigment Index	
a) Abreviatura	SIPI
b) Nombre en español	Índice de Pigmento Insensible a la Estructura
c) Definición	Diseñado para minimizar la influencia de las variaciones estructurales de la vegetación, enfocándose principalmente en la relación entre los pigmentos de la clorofila y los carotenoides. Útil para estudios donde se necesita monitorear la salud de la vegetación y el estrés, prestando atención a los pigmentos fotosintéticos
d) Aplicación general o específica	Aplicación general para evaluación y monitoreo de la salud de la vegetación, donde se busca medir la proporción de pigmentos fotosintéticos y detectar el estrés de las especies vegetales
e) Formulación de cálculo	$SIPI = (NIR - Blue) / (NIR - Red)$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Blue: Reflectancia en la banda azul Red: Reflectancia en la banda roja
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Su principal objetivo es detectar cambios en la proporción de pigmentos fotosintéticos, no la cantidad total de vegetación. Generalmente varía entre 0 y valores superiores a 1, sin un límite superior fijo, dependiendo de la proporción entre carotenoides y clorofila en la vegetación
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color, donde los valores altos (indicativos de mayor estrés) suelen mostrarse en tonos cálidos (rojos, naranjas), y los valores bajos (indicativos de vegetación sana) en tonos fríos (verdes)
i) Escala de aplicación del Indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Propuesto por Penuelas et al. (1995)
7) Normalized Difference Moisture Index	
a) Abreviatura	NDMI
b) Nombre en español	Índice de Diferencia Normalizada de Humedad
c) Definición	Se utiliza para determinar el contenido de agua o humedad de la vegetación. Utiliza la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR)
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica en estudios de monitoreo de humedad en suelos y vegetación, para detectar estrés hídrico, evaluar condiciones de sequía, y gestionar el riego en la agricultura.
e) Formulación de cálculo	$NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana SWIR1: Reflectancia en la banda infrarroja de onda corta

f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Varía de -1 a 1, donde los valores más altos indican mayor contenido de humedad en la vegetación, y los valores más bajos reflejan estrés hídrico o vegetación seca
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del Indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Desarrollado por Gao (1996)
8) Simple Ratio	
a) Abreviatura	SR
b) Nombre en español	Relación Simple
c) Definición	Uno de los índices de vegetación más antiguos y sencillos empleados en teledetección. Se calcula como la relación entre la reflectancia en la banda infrarroja cercana (NIR) y la reflectancia en la banda roja (Red). Es un indicador de la cantidad de biomasa verde y la salud de la vegetación, ya que la vegetación sana refleja más en el NIR y absorbe más en el espectro rojo
d) Aplicación general o específica	De aplicación muy general para medir la cantidad de vegetación, la biomasa verde, y la productividad de los ecosistemas. Se utiliza comúnmente en estudios de agricultura, silvicultura y monitoreo de ecosistemas.
e) Formulación de cálculo	SR = NIR/Red Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Por su sencillez es accesible a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	El rango de valores que varía entre 0 y valores superiores a 1, sin un límite máximo específico. A diferencia de índices como el NDVI, puede tomar valores mayores en áreas con vegetación muy densa
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Descrito por Jordan (1969)
9) Normalized Burn Ratio Index	
a) Abreviatura	NBRI
b) Nombre en español	Índice de Calcinación Normalizado
c) Definición	Aprovecha las bandas espectrales de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR2), que son sensibles a los cambios en la vegetación, para detectar áreas quemadas y monitorear la recuperación del ecosistema. Se basa en la capacidad de la vegetación sana para

	reflejar el NIR y absorber el SWIR1, mientras que las áreas quemadas reflejan menos en el NIR y más en el SWIR2
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica para la detección de áreas quemadas y la evaluación de la severidad de incendios. Se utiliza en estudios para la restauración de áreas afectadas por incendios
e) Formulación de cálculo	NDMI = $(\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2})$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana SWIR2: Reflectancia en la banda infrarroja de onda corta
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Ampliamente accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. Existen colecciones preprocesadas de NDVI en las plataformas.
g) Tipo de resultados y escala de valores	Varía entre -1 y 1. Los valores más bajos (cerca de -1) indican áreas severamente quemadas, mientras que valores más altos (cerca de 1) indican vegetación sana.
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del Indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Propuesto por Key y Benson (1999)
10) Green Coverage Index	
a) Abreviatura	GCI
b) Nombre en español	Índice de Cobertura Verde
c) Definición	Se basa en la reflectancia en las bandas infrarroja cercana (NIR) y verde (Green), con el fin de realzar, únicamente, aquellos elementos formados por estructura vegetal. Útil para la detección de la biomasa verde y el vigor de la vegetación en diferentes tipos de vegetación
d) Aplicación general o específica	Aplicación general para el monitoreo de la vegetación, evaluación del vigor de cultivos, y estudios ecológicos que involucren la cobertura verde
e) Formulación de cálculo	GCI = $(\text{NIR}) / (\text{Green}) - 1$ Donde: NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Green: Reflectancia en la banda verde
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Accesibles a través de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Los valores más altos indican una mayor cobertura verde y vigor de la vegetación, mientras que los valores más bajos indican menor cobertura verde o vegetación con menos vigor. Su escala inicia en 0 y no tiene un límite máximo específico
h) Forma de representación	Cartográfica, generalmente en mapas de imágenes de tonos de color. Las áreas con valores más altos suelen estar representadas por colores más brillantes, y las áreas con valores más bajos, por tonos más oscuros
i) Escala de aplicación del Indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Descrito por Gitelson et al. (2002)

11) Shortwave Infrared Water Stress Index	
a) Abreviatura	SIWSI
b) Nombre en español	Índice de Estrés Hídrico en el Infrarrojo de Onda Corta
c) Definición	Fue diseñado para utilizar la reflectancia las bandas MODIS infrarroja cercana (NIR) y de infrarroja de onda corta (SWIR), ya que la vegetación con mayor contenido de agua refleja más en el NIR y menos en el SWIR. Evalúa el contenido de agua en la vegetación y detecta el estrés hídrico en áreas vegetadas
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica para la detección de estrés hídrico en vegetación y el monitoreo del contenido de agua en las plantas. Se utiliza en la gestión de recursos hídricos y agricultura fundamentalmente
e) Formulación de cálculo	$SIWSI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$ Donde, al ser específico para MODIS: SWIR: Reflectancia en la banda infrarroja de onda corta: Banda (1230–1250 nm) o 6 (1628–1652 nm) NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana: Banda (841–876 nm)
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Accesibles a través de imágenes satelitales de la plataforma MODIS. No existen colecciones preprocesadas
g) Tipo de resultados y escala de valores	Los valores oscilan entre -1 y 1. Valores cercanos a 1 indican un bajo nivel de estrés hídrico, es decir, vegetación con mayor contenido de agua, mientras que valores más cercanos a -1 indican vegetación en condiciones de estrés hídrico.
h) Forma de representación	Cartográfica, en mapas de estrés hídrico, donde los valores bajos (colores oscuros) indican vegetación con estrés hídrico, y los valores altos (colores claros) indican vegetación sana con suficiente agua
i) Escala de aplicación del Indicador	Desde regional, como polígonos de 100 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Al ser un índice específico para MODIS dependiendo de factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario
k) Fuente del indicador	Descrito por Fensholt y Sandholt (2003)
12) Spectral Variability Vegetation Index	
a) Abreviatura	SVVI
b) Nombre en español	Índice de Variabilidad Espectral de la Vegetación
c) Definición	Índice numérico, que mide la heterogeneidad espectral de un área, indicando la diversidad de la vegetación presente. Se lo utiliza para identificar áreas con alta diversidad de especies y cambios en la composición de la vegetación
d) Aplicación general o específica	Se lo utiliza para identificar áreas con alta diversidad de especies, para detectar cambios en la composición de la vegetación, y para evaluar la heterogeneidad del paisaje. Es particularmente útil en estudios de biodiversidad, ecología del paisaje y monitoreo de cambios en la cobertura terrestre
e) Formulación de cálculo	$SVVI = \sigma \text{ (reflectancia en múltiples bandas)} / \text{Media de reflectancias en múltiples bandas}$ Donde: σ : desviación estándar
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Los datos para calcular el SVVI se obtienen de imágenes satelitales de plataformas como Landsat, MODIS y Sentinel.
g) Tipo de resultados y escala de valores	Los resultados del SVVI son valores numéricos que indican el grado de heterogeneidad espectral. Valores altos indican una mayor diversidad de

	vegetación, mientras que valores bajos sugieren una vegetación más homogénea. La escala puede variar según los datos utilizados
h) Forma de representación	Mapas temáticos, donde los valores del SVVI se representan a través de una escala de colores, con colores cálidos para valores altos y colores fríos para valores bajos.
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local, como polígonos de 10 ha hasta global (cobertura vegetal a nivel planetario)
j) Periodicidad en la aplicación	Dependiendo de la disponibilidad de datos satelitales y otros factores como la nubosidad del sitio de estudio, puede ser diario en el caso de MODIS
k) Fuente del indicador	Descrito por Gamon y Surfus (1999)
13) Vegetation Atmospherically Resistant Index	
a) Abreviatura	VARI
b) Nombre en español	Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente
c) Definición	Mide la vigorosidad de la vegetación, este índice está diseñado para ser menos sensible a los efectos atmosféricos que el NDVI. Utiliza una combinación de bandas espectrales roja, verde y azul para minimizar la influencia de la atmósfera
d) Aplicación general o específica	Es ideal para ser aplicados en áreas con alta turbidez atmosférica, como zonas urbanas o regiones con alta concentración de aerosoles. Se utiliza para monitorear la vegetación en condiciones atmosféricas adversas
e) Formulación de cálculo	$VARI = (Green - Red) / (Green + Red + Blue)$ Donde: Green: Reflectancia en la banda del verde Red: Reflectancia en la banda del rojo Blue: Reflectancia en la banda del azul
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Se calcula a partir de imágenes satelitales multiespectrales que contengan las bandas rojas, verde y azul. Plataformas como Landsat, Sentinel y MODIS proporcionan estas bandas.
g) Tipo de resultados y escala de valores	Los valores del VARI varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una alta densidad de vegetación y valores cercanos a -1 indican la ausencia de vegetación o la presencia de agua
h) Forma de representación	Cartográfica, similar al NDVI, en mapas de imágenes de tonos de color
i) Escala de aplicación del indicador	Desde local hasta global, similar a otros índices de vegetación
j) Periodicidad en la aplicación	Depende de la disponibilidad de imágenes satelitales y la frecuencia de adquisición de imágenes.
k) Fuente del indicador	Descrito por Gitelson et al. (2002)
14) Photochemical Reflectance Index	
a) Abreviatura	PRI
b) Nombre en español	Índice de Reflectancia Fotoquímica
c) Definición	El PRI es un índice espectral el cual esta permite estimar la eficiencia en el uso de la luz en la fotosíntesis de las plantas. Se basa en la variación de la reflectancia en las bandas verde y azul, está relacionado con los cambios en el pigmento carotenóide, particularmente la xantofila, que se asocian con el estado fotoquímico de las plantas
d) Aplicación general o específica	Su aplicación es específica en el monitoreo del estrés fotosintético y la eficiencia del uso de la luz en la vegetación

e) Formulación de cálculo	$PRI = \frac{\text{Reflectancia en 531 nm} - \text{Reflectancia en 570 nm}}{\text{Reflectancia en 531 nm} + \text{Reflectancia en 570 nm}}$
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Requiere imágenes hiperespectrales o multispectrales con bandas en el espectro visible, especialmente alrededor de los 531 nm y 570 nm. Estas bandas pueden obtenerse de sensores especializados
g) Tipo de resultados y escala de valores	Índice numérico que refleja la eficiencia en el uso de la luz y el estado de la fotoquímica de las plantas
h) Forma de representación	Mapas raster o gráficos que muestran las variaciones en la eficiencia fotosintética en una región
i) Escala de aplicación del indicador	Puede aplicarse desde la escala local a regional; es útil para estudios de monitoreo del estrés fotosintético a lo largo del tiempo
j) Periodicidad en la aplicación	Puede aplicarse con frecuencia dependiendo de la disponibilidad de imágenes satelitales o aéreas
k) Fuente del indicador	Descrito por Gamon et al. (1990)
15) Red-edge Vegetation Stress Index	
a) Abreviatura	RVSI
b) Nombre en español	Índice de Estrés de la Vegetación en el Borde Rojo
c) Definición	Este es un índice espectral diseñado para detectar el estrés de la vegetación utilizando la posición de la banda del borde rojo en el espectro. El borde rojo está entre el espectro visible y el infrarrojo cercano, donde se observa una rápida transición en la reflectancia de la vegetación. Es sensible a cambios en el contenido de clorofila y en el estado de salud de las plantas.
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica para detectar el estrés de la vegetación, monitorear la salud del dosel vegetal, y cambios en el contenido de clorofila.
e) Formulación de Cálculo	$RVSI = \frac{\text{Reflectancia en el borde rojo} - \text{Reflectancia en el infrarrojo cercano}}{\text{Reflectancia en el borde rojo} + \text{Reflectancia en el infrarrojo cercano}}$ Dónde: Las bandas utilizadas pueden estar alrededor de los 700 nm (borde rojo) y 750 nm (infrarrojo cercano)
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Requiere imágenes hiperespectrales o sensores que capturen la banda del borde rojo, disponibles en plataformas como Sentinel-2.
g) Tipo de resultados y escala de valores	Índice numérico que indica el nivel de estrés de la vegetación.
h) Forma de Representación	Mapas raster que muestran la variación espacial del estrés de la vegetación.
i) Escala de Aplicación del Indicador	Aplicable a escalas local, regional o global para monitoreo agrícola o ambiental.
j) Periodicidad en la Aplicación	Se puede aplicar regularmente en función de la disponibilidad de imágenes satelitales; útil para monitoreo continuo.
k) Fuente del indicador	Descrito por Gitelson et al. (1996)
16) Global Environmental Monitoring Index	
a) Abreviatura	GEMI
b) Nombre en español	Índice Global de Monitoreo Ambiental
c) Definición	El GEMI es un índice diseñado para monitorear el estado de la vegetación mediante el uso de reflectancia espectral, reduciendo la influencia de la atmósfera en la medición, de la misma forma que mejora el análisis de la vegetación respecto a otros índices como el NDVI, proporcionando una relación más robusta con la biomasa y minimizando el impacto de los aerosoles atmosféricos

d) Aplicación general o específica	Aplicación general en estudios de monitoreo ambiental y evaluación de la vegetación en áreas extensas, especialmente en condiciones atmosféricas variables.
e) Formulación de Cálculo	$GEMI = \eta \times (1 - 0.25 \times \eta) - [(Red - 0.125) / (1 - Red)]$ Donde: $\eta = 2 \times (NIR2 - Red2) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times Red / NIR + Red + 0.5$ NIR: Reflectancia en la banda infrarroja cercana Red: Reflectancia en la banda roja
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Se puede calcular utilizando datos satelitales como MODIS, Sentinel-2, y Landsat que proveen bandas en el espectro rojo y cercano al infrarrojo.
g) Tipo de resultados y escala de valores	Valor continuo, generalmente entre -1 y 1, donde los valores más altos indican una mayor densidad de vegetación
h) Forma de Representación	Mapas de distribución espacial, gráficos de tendencia temporal para monitorear la salud de la vegetación en diversas áreas
i) Escala de Aplicación del Indicador	Escala local, regional y global; se utiliza en estudios de monitoreo del medio ambiente y en modelos climáticos
j) Periodicidad en la Aplicación	Puede ser aplicado de forma diaria, semanal o mensual, dependiendo de los datos satelitales disponibles
k) Fuente del indicador	Propuesto por Pinty y Verstraete (1992)
17) Modified Anthocyanin Reflectance Index	
a) Abreviatura	mARI
b) Nombre en español	Índice de Reflectancia Modificada de Antocianinas
c) Definición	El mARI (ARI2) es una modificación del Índice de Reflectancia de Antocianinas (ARI), diseñado para medir el contenido de antocianinas en las hojas. Las antocianinas son pigmentos importantes en la protección de la planta frente a la radiación ultravioleta y en la detección de estrés en la vegetación
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica para la evaluación de los niveles de antocianinas en la vegetación, útil en estudios de estrés vegetal y monitoreo del cambio estacional
e) Formulación de Cálculo	$mARI (ARI2) = ((1/550 \text{ nm}) - (1/700 \text{ nm})) * NIR$ Donde: 550 nm: Reflectancia en la banda verde (550 nanómetros). 700 nm: Reflectancia en la banda del borde rojo (700 nanómetros). NIR: Reflectancia en el infrarrojo cercano
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Se puede calcular con datos satelitales y sensores que incluyan las bandas verdes, roja, y del infrarrojo cercano, como Sentinel-2, Landsat o instrumentos hiperspectrales
g) Tipo de resultados y escala de valores	Valores continuos que representan el contenido relativo de antocianinas en las hojas de las plantas
h) Forma de Representación	Mapas espaciales y gráficos temporales que muestran la distribución y cambios en el contenido de antocianinas
i) Escala de Aplicación del Indicador	Escala local y regional, aplicable tanto en estudios de parcelas agrícolas como en áreas forestales y ecosistemas naturales
j) Periodicidad en la Aplicación	Dependiendo de la frecuencia de los datos de teledetección, puede aplicarse de manera estacional o en períodos cortos para monitorear cambios en el estrés vegetal
k) Fuente del Indicador	Descrito por Gitelson y Merzlyak (1996)
18) Normalized Degradation Fraction Index	
a) Abreviatura	NDFI
b) Nombre en español	Índice Normalizado de Fracción de Degradación

c) Definición	El NDFI es un índice espectral diseñado para evaluar la degradación de la vegetación en áreas naturales y modificadas. Este índice es útil para detectar la proporción de vegetación verde y sombreada (GVSh) en comparación con la vegetación no fotosintética (NPV) y el suelo expuesto (So), lo que permite monitorear el estado de degradación del suelo y los cambios en el ecosistema
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica para evaluar la degradación del suelo, deforestación, desertificación y el impacto de actividades humanas en ecosistemas naturales
e) Formulación de Cálculo	NDFI= $\frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$ Donde: NIR: Reflectancia en el infrarrojo cercano. SWIR: Reflectancia en el infrarrojo de onda corta
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Se puede calcular con imágenes de satélite que incluyan las bandas de NIR y SWIR, como Landsat, MODIS, Sentinel-2, entre otros
g) Tipo de resultados y escala de valores	Valores continuos que representan el grado de degradación o salud de la vegetación, donde los valores más bajos indican mayor degradación
h) Forma de Representación	Mapas temáticos que muestran el estado de degradación de la vegetación y el suelo en áreas de interés
i) Escala de Aplicación del Indicador	Puede aplicarse en escalas local, regional y global, adecuado para estudios de cambio en el uso del suelo y restauración ambiental
j) Periodicidad en la Aplicación	Ideal para monitoreo temporal con frecuencia estacional o anual, según la disponibilidad de imágenes satelitales
k) Fuente del Indicador	Descrito por Roberts et al. (2002)
19) Infrared Index	
a) Abreviatura	IRI
b) Nombre en español	Índice de Infrarrojo
c) Definición	El Índice de Infrarrojo (IRI) es un índice espectral utilizado para evaluar la cantidad de biomasa y la salud de la vegetación. Se basa en la diferencia entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (MIR), aprovechando la capacidad de estas bandas para detectar cambios en la vegetación
d) Aplicación general o específica	Aplicación específica en el monitoreo de estrés hídrico, biomasa y otras características de la vegetación, especialmente en ambientes agrícolas y forestales.
e) Formulación de Cálculo	$IRI = \frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$ Donde: NIR es el infrarrojo cercano MIR es el infrarrojo medio
f) Disponibilidad de datos para su cálculo	Los datos necesarios para el cálculo del IRI están disponibles en imágenes satelitales con bandas NIR y MIR, como las obtenidas de sensores como MODIS, Landsat y Sentinel-2
g) Tipo de resultados y escala de valores	Valores normalizados que oscilan entre -1 y +1, donde los valores más altos indican mayor biomasa o menor estrés hídrico, y los valores más bajos pueden reflejar estrés en la vegetación o suelos secos
h) Forma de Representación	Mapa de índice en escala de grises o en color, que destaca las áreas con mayor o menor biomasa o estrés hídrico
i) Escala de Aplicación del Indicador	Escala regional a global, utilizado en estudios de agricultura, bosques, y monitoreo de áreas con vegetación densa

j) Periodicidad en la Aplicación	Puede ser calculado regularmente, dependiendo de la disponibilidad de imágenes satelitales (diaria, semanal o mensual)
k) Fuente del Indicador	Descrito por Kulawardhana y Jones (2011)

6.2.2. Calificación de indicadores

La Tabla 8 muestra la calificación de los indicadores finales, basada en los criterios establecidos, en donde cada letra respresenta un criterio de evaluación como lo muestra la Tabla 3. En el nivel de aplicación "muy alta", destacan tres indicadores: NDVI, AVI y EVI, con promedios de 4,23, 4,04 y 4,03, respectivamente. Estos indicadores obtuvieron sus mejores puntuaciones en los criterios de: Requerimiento de datos de campo (B), Requerimiento de información digital adicional (C), Imágenes gratuitas para el cálculo del índice espectral (D) y Resolución espacial (F). No obstante, presentaron calificaciones más bajas en los criterios de Resolución temporal (G), Vacíos espaciales y temporales de información (H) y Requerimiento económico de hardware (I). En particular, el NDVI se destacó con la máxima calificación (5) en el criterio de frecuencia normalizada, superando a todos los demás indicadores en este aspecto.

En el nivel de aplicación "alta" (Tabla 3), los indicadores SAVI, WDRVI y SR alcanzaron promedios de 3,60, 3,55 y 3,40, respectivamente. Estos indicadores presentaron ciertas limitaciones en criterios como Información del índice espectral (E), lo cual puede afectar su interpretación bajo determinadas condiciones. Cabe mencionar que el SAVI muestra puntuaciones estables en todos los criterios, aunque no suficientes para alcanzar la categoría de "muy alta" aplicabilidad.

Por otro lado, los indicadores con puntuaciones más bajas pertenecen a la categoría de aplicación "media". Esta categoría incluye a GEMI, mARI, NDFI e IRI, con promedios de 2,70, 2,55, 2,55 y 2,47, respectivamente. De estos, GEMI y mARI alcanzaron la calificación máxima de 5 en solo dos criterios, mientras que NDFI e IRI lograron dicha calificación en uno y ninguno de los criterios, respectivamente.

Tabla 8. Calificación de indicadores según los criterios establecidos

ID	Indicador	Frecuencia	Criterios de calificación													Aplicación	Promedio	
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M			
1	NDVI	31	5,0	5	5	5	5	5	5	3	3	3	4	5	4	3	MUY ALTA	4,23
2	AVI	3	0,5	5	5	5	4	5	3	3	3	4	5	5	5		MUY ALTA	4,04
3	EVI	9	1,5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	5	5	4		MUY ALTA	4,03

ID	Indicador	Frecuencia	Criterios de calificación													Aplicación	Promedio
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M		
4	SAVI	5	0,8	4	4	5	4	5	3	3	3	3	5	4	3	ALTA	3,60
5	WDRVI	1	0,2	4	5	5	2	5	3	3	3	4	5	4	3	ALTA	3,55
6	SR	1	0,2	5	5	5	1	5	3	3	3	4	5	2	3	ALTA	3,40
7	SVVI	1	0,2	5	5	5	1	5	1	3	3	4	4	4	4	ALTA	3,40
8	NDMI	2	0,3	4	5	5	2	5	3	3	3	3	3	5	2	ALTA	3,33
9	SIPI	1	0,2	4	5	5	2	5	3	3	3	3	2	5	2	ALTA	3,24
10	GCI	1	0,2	3	4	5	2	5	3	3	3	3	4	3	4	ALTA	3,24
11	SIWSI	1	0,2	5	5	5	1	1	5	3	3	4	3	5	2	ALTA	3,24
12	NBRI	2	0,3	3	5	5	2	5	3	3	3	3	2	4	3	ALTA	3,18
13	VARI	2	0,3	3	4	5	2	5	3	2	3	2	4	3	4	ALTA	3,10
14	PRI	1	0,2	5	4	5	1	1	5	3	3	2	3	5	2	ALTA	3,01
15	RVSI	1	0,2	5	3	5	1	4	4	2	3	2	2	5	3	ALTA	3,01
16	GEMI	1	0,2	4	3	5	1	1	5	2	2	1	4	3	4	MEDIA	2,70
17	mARI	1	0,2	3	3	5	1	4	2	3	2	1	2	5	2	MEDIA	2,55
18	NDFI	1	0,2	3	1	3	1	5	3	3	2	1	3	4	4	MEDIA	2,55
19	IRI	1	0,2	3	3	3	1	3	1	2	3	3	3	4	3	MEDIA	2,47

6.3. Aplicación de indicadores ecológicos a nivel espacial para el monitoreo de la restauración de paisajes

En esta sección se presentan los resultados de las anomalías y tendencias de las series temporales de los indicadores NDVI, AVI y EVI, que fueron seleccionados por su muy alta aplicabilidad.

6.3.1. Análisis de anomalías

En este apartado se presentan las anomalías estándar (anomalías sd) espaciales de NDVI, EVI, AVI aplicados en los cinco polígonos del estudio de investigación. Las anomalías fueron obtenidas a partir de la aplicación del script desarrollado en GEE que consta en el Anexo 2. Estas anomalías reflejan desviaciones respecto a los valores promedio históricos (1996-2023) y permiten identificar patrones de cambio en la cobertura vegetal y otros elementos del paisaje (Figura 12).

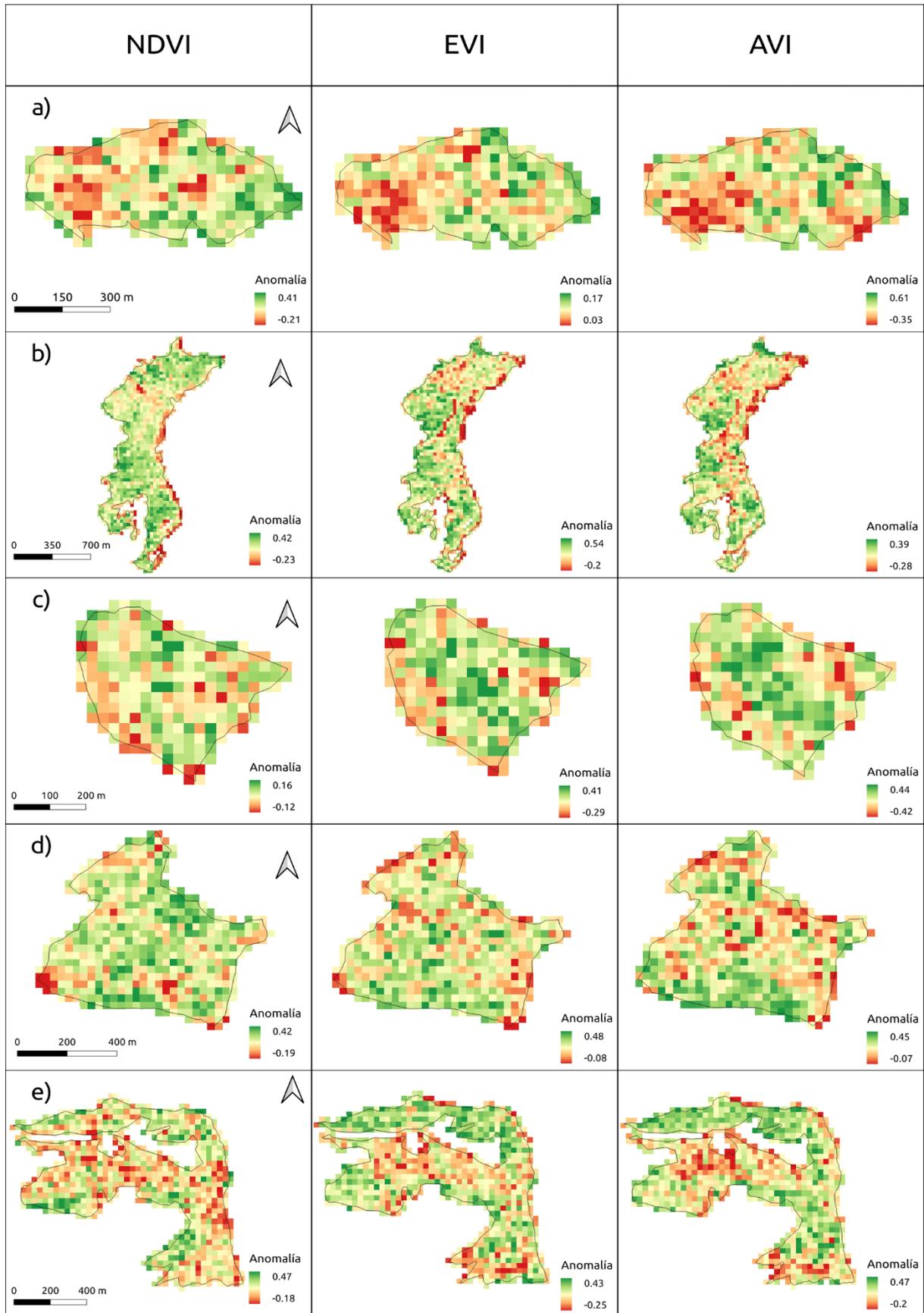


Figura 12. Anomalías estándar (1996-2023) de los indicadores espaciales aplicadas en las cinco áreas de estudio: a) La Aguangora, b) Akakana, c) Guaguelpamba, d) Masaca y e) La Argelia.

En la Figura 12 se observan las anomalías de los indicadores NDVI, EVI y AVI, en las áreas de estudio, donde la paleta de colores utilizada va desde rojo (anomalías negativas) hasta verde (anomalías positivas). Las anomalías negativas indican áreas donde la vegetación o las condiciones asociadas han disminuido significativamente, reflejando posiblemente procesos de degradación o pérdida de cobertura vegetal. En contraste, las anomalías positivas representan regiones donde las condiciones han mejorado o presentan una mayor densidad de vegetación respecto al promedio histórico, mostrando una recuperación de masa vegetal a través de procesos de restauración.

Las anomalías de NDVI, en general, están distribuidas de forma heterogénea en todas las áreas de estudio. Por ejemplo, en La Aguangora (subfigura 10.a), las áreas rojas predominan en el centro y noroeste del polígono, mientras que en Akakana (subfigura 10.b), las anomalías negativas tienden a concentrarse a lo largo de corredores específicos.

El EVI que es más sensible a la vegetación densa, muestra un patrón espacial similar al NDVI, pero con diferencias en la intensidad de las anomalías. En Akakana y La Argelia (subfiguras 10. b y 10.e), se observan valores positivos más marcados que podrían reflejar áreas con alta densidad de vegetación. Las anomalías negativas, en cambio, parecen más concentradas en los bordes de los polígonos, lo que podría indicar degradación periférica.

En el caso del AVI, su formulación permite identificar cambios en la densidad y el vigor de la vegetación, lo que lo hace especialmente útil en áreas donde los factores ambientales incluyen tanto la cobertura vegetal como las características del suelo, lo que resulta en anomalías más intensas en ciertas áreas, como Guaguelpamba y Masaca (subfiguras 10. c y 10.d). En estas regiones, el AVI podría estar reflejando no solo cambios en la cobertura vegetal, sino también alteraciones en las propiedades del suelo o el paisaje, explicando las diferencias en la distribución de las anomalías respecto al NDVI y EVI.

6.3.2. Series temporales para anomalías de los indicadores espaciales

Tras analizar la serie temporal de las anomalías estandarizadas de los índices de vegetación (NDVI, AVI y EVI) en las cinco áreas seleccionadas del norte del cantón Loja, los resultados evidenciaron patrones de variación en la cobertura vegetal durante el período 1996-2023. Estos patrones se presentan a continuación en las figuras de las series temporales de las anomalías estandarizadas de los índices mencionados.

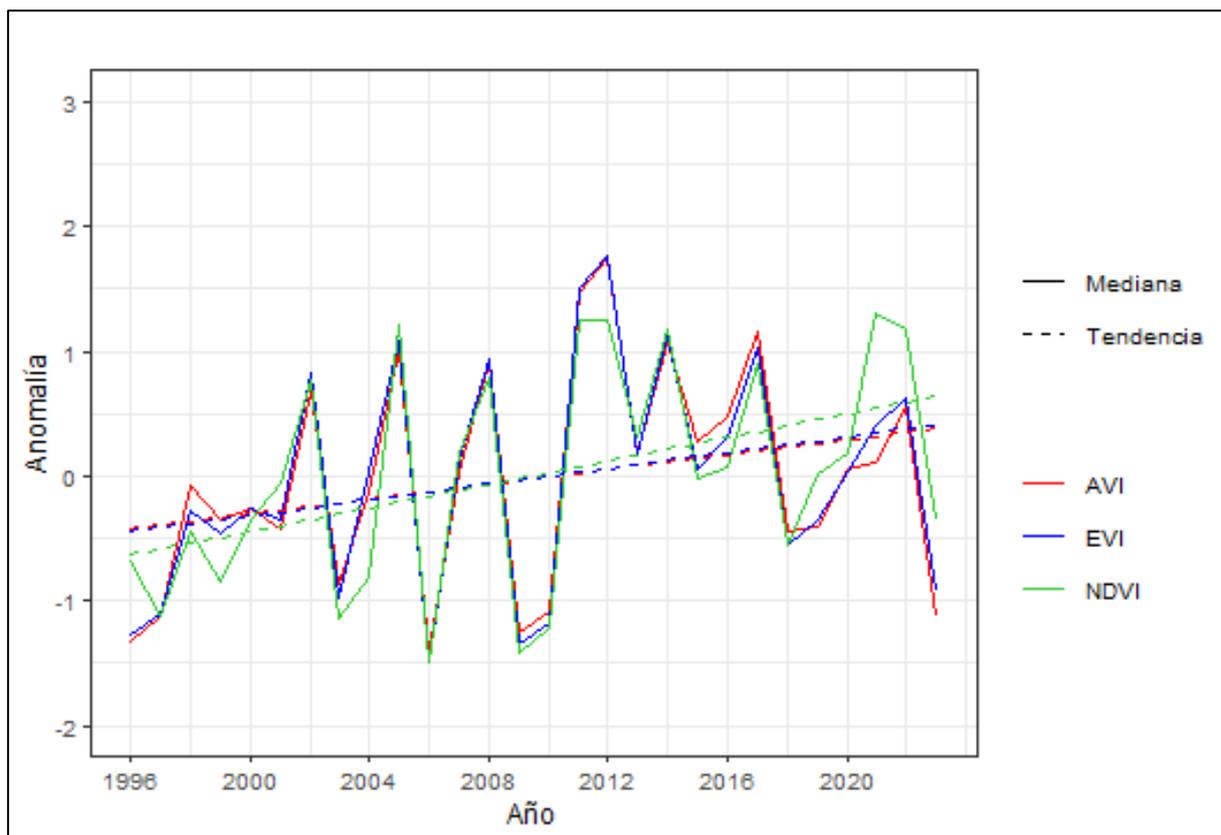


Figura 13. Series temporales de anomalías estandarizadas del área La Aguangora

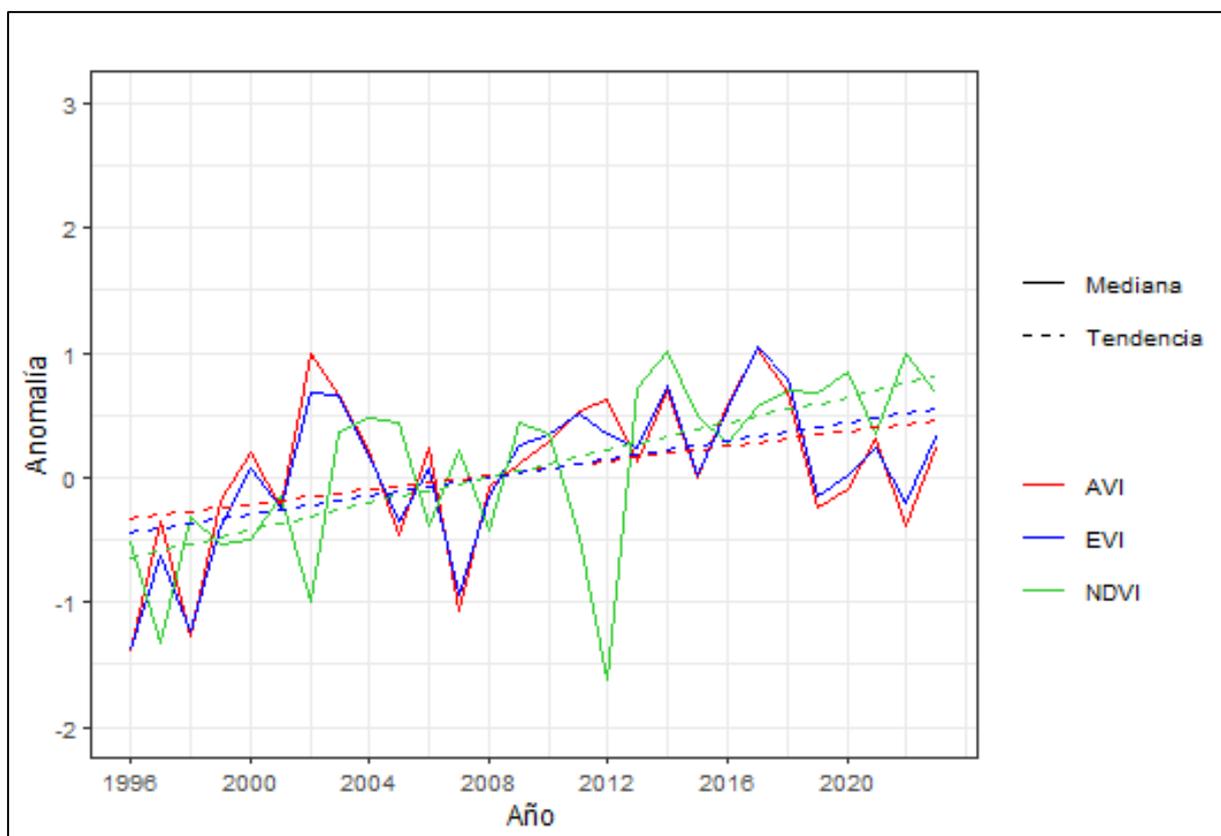


Figura 14. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Akakana.

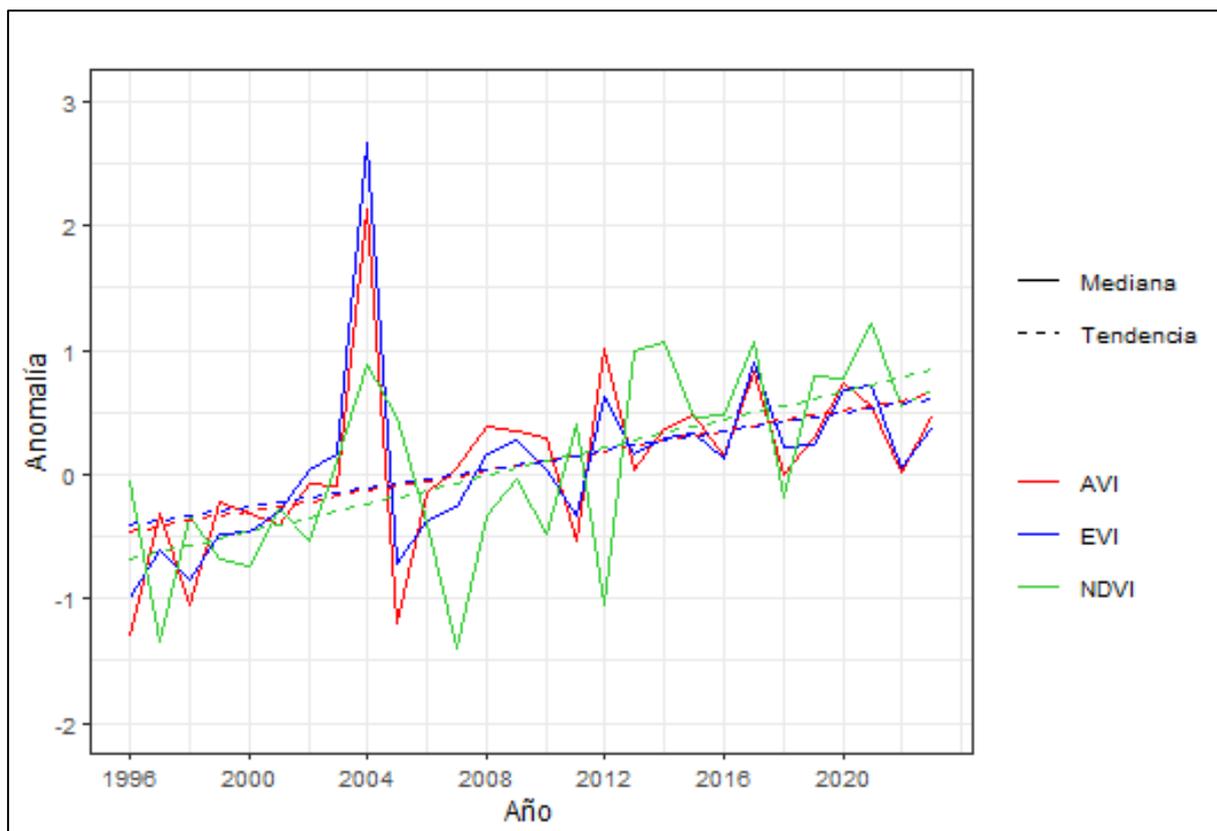


Figura 15. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Guaguelpamba.

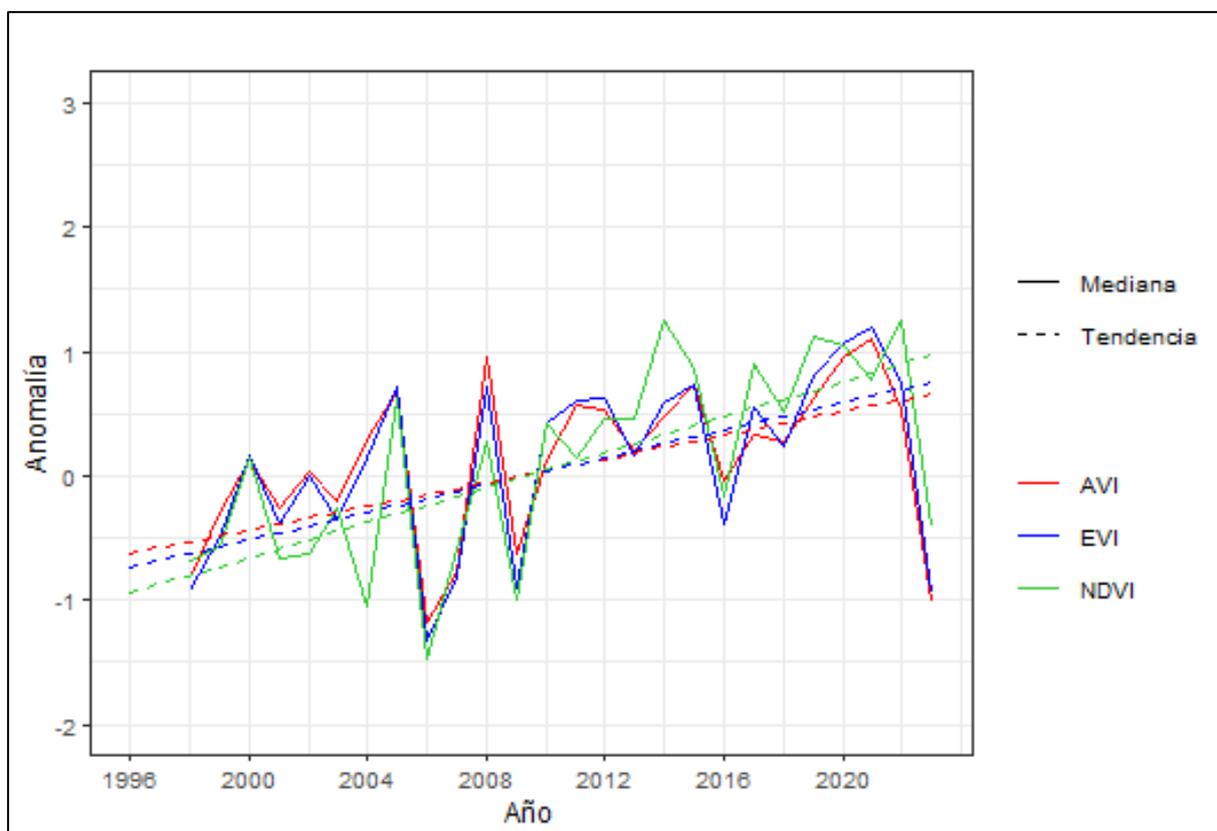


Figura 16. Series temporales de anomalías estandarizadas del área Masaca.

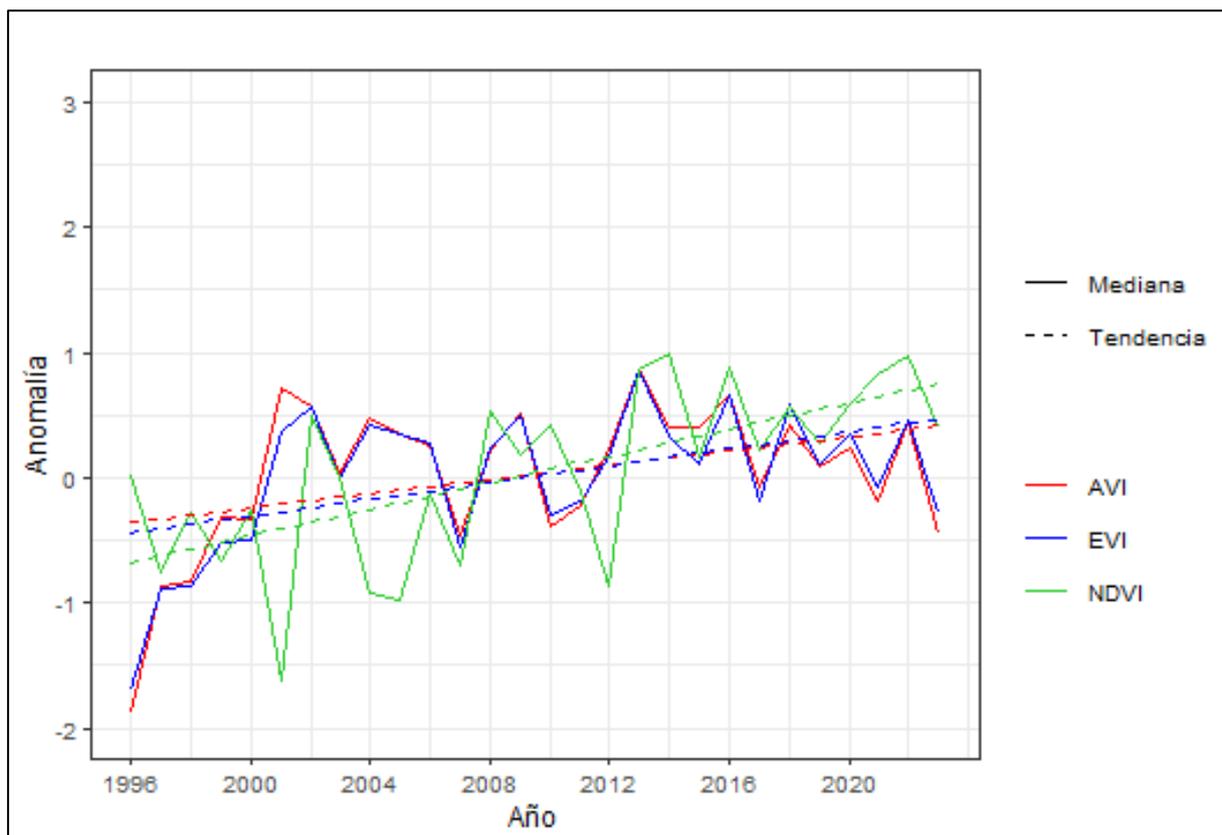


Figura 17. Series temporales de anomalías estandarizadas del La Argelia.

En el análisis de las series temporales, se identificó un patrón consistente en todas las áreas de estudio, caracterizado por una ligera tendencia positiva en las anomalías de todos los indicadores. Esto refleja un incremento gradual en la cobertura vegetal y, en consecuencia, en la actividad fotosintética, lo que sugiere una leve recuperación de la vegetación.

La mayoría de las áreas muestran similitudes en cuanto a anomalías negativas al inicio de la serie (1996-2000). En los periodos 2004 - 2005 y 2008 - 2009 se presentan períodos de anomalías negativas marcadas, mientras que en el periodo 2012 - 2016 se muestran valores consistentemente positivos en la mayoría de las áreas. El NDVI tiende a mostrar fluctuaciones más pronunciadas en algunas áreas, mientras que el AVI y EVI muestran patrones más cercanos entre sí.

Los resultados sugieren una heterogeneidad en la dinámica de la vegetación entre las diferentes áreas, lo cual puede estar relacionado con factores locales como el clima, el uso del suelo y las prácticas de manejo que permiten de alguna manera la recuperación de cobertura vegetal mediante procesos de restauración pasiva que

En la Tabla 9 se detallan los resultados del test de Mann-Kendall y la pendiente de Theil-Sen para las anomalías de los indicadores analizados: NDVI, AVI y EVI.

Tabla 9. Valores de la aplicación del test de Mann-Kendall y el estimador Theil-Sen

Sector	NDVI			AVI			EVI		
	Mk test z	P valor	Theil-sen	Mk test z	P valor	Theil-sen	Mk test z	P valor	Theil-sen
Akakana	3,7345	0,0001885	0,05224719	1,8769	0,06054	0,02751212	2,3905	0,01682	0,03671396
La Argelia	3,4969	0,0004707	0,04850867	1,3237	0,1856	0,01938987	1,9164	0,05532	0,0259977
Masaca	3,8525	0,0001169	0,073313	3,0623	0,002197	0,04790624	3,2993	0,0009691	0,05900182
La Aguangora	2,1139	0,03452	0,04730835	1,5608	0,1186	0,03490205	1,6398	0,101	0,03271314
Guaguelpamba	3,2993	0,0009691	0,05735872	3,4179	0,0006311	0,04280774	4,2081	0,00002575	0,0460491

Para NDVI, los resultados de los valores de Z y los p-valores reflejan una tendencia significativa creciente en todas las áreas de estudio, indicando un aumento en el índice de vegetación. Las pendientes de Theil-Sen son positivas, destacándose valores como 0,05224719 en Akakana y 0,0733133 en Masaca, lo que confirma un incremento anual en el índice NDVI en las áreas evaluadas.

En el caso del AVI, los resultados muestran una heterogeneidad entre las áreas de estudio. Masaca y Guaguelpamba presentan una tendencia positiva significativa, con valores de Z de 3,0623 y 3,4179, respectivamente, y p-valores menores a 0,01. Por otro lado, Akakana, La Argelia y La Aguangora tienen tendencias positivas no significativas, con p-valores superiores a 0,05. Las pendientes de Theil-Sen son positivas en todas las áreas, aunque las magnitudes son más bajas en comparación con NDVI y EVI, destacándose valores como 0,047906 en Masaca y 0,042807 en Guaguelpamba.

En lo referente al EVI, la mayoría de las áreas muestran tendencias ascendentes, con valores de Z positivos y p-valores significativos en la mayoría de los casos. Guaguelpamba tiene la tendencia más destacada, con un valor de Z de 4,2081 y un p-valor menor a 0,0001. La única excepción es La Aguangora, que presenta una tendencia no significativa con un p-valor de 0,101. Las pendientes de Theil-Sen también son positivas, indicando un crecimiento anual del índice, siendo el mayor incremento en Guaguelpamba (0,04604911). Estos resultados reflejan una mejora en la vegetación, aunque las magnitudes son ligeramente menores en comparación con NDVI.

7. Discusión

La propuesta de indicadores espaciales para el monitoreo de la restauración permitió realizar una revisión profunda de la literatura científica y conocer la aplicación práctica de estos indicadores en diversas áreas del conocimiento, especialmente en el monitoreo de procesos de restauración. Los resultados obtenidos destacan la importancia de la aplicabilidad de los indicadores espaciales en el monitoreo de procesos ecológicos y ambientales, demostrando ser una herramienta crucial para su análisis. A continuación, se discuten los resultados en relación con los objetivos planteados en esta investigación.

7.1. Análisis de la identificación de indicadores

Adams (2005) establece que, en las categorías de investigación basadas en las ciencias biológicas, existe una correlación significativa entre las citas de literatura científica en los primeros 10 años de su publicación; es decir, las investigaciones recién publicadas tienden a ser citadas con mayor frecuencia. Para este estudio, se consideró un período de 24 años para la consulta de la base de datos con el fin de conocer el estado del arte del tema de investigación y su evolución en los últimos años, reduciendo así los sesgos en los resultados del análisis de la literatura científica.

En cuanto al análisis de impacto por países, Brasil es el que ha realizado diversos estudios en cuanto a restauración ecológica, análisis de procesos ecológicos con teledetección, incluyendo aspectos de biodiversidad, cobertura vegetal, calidad del suelo y dinámica hídrica. En un estudio bibliométrico realizado para Latinoamérica, Sánchez-Perdomo et al. (2017), analizan la productividad y el impacto de los países en Latinoamérica, donde señalan que el más sobresaliente es Brasil, y establece que este desarrollo investigativo es debido, a que es el país más extenso de la región, tiene el mayor desarrollo socioeconómico, además destina el 1.21% del PIB en investigación y desarrollo.

El uso de teledetección para el análisis de procesos ecológicos y de aspectos de biodiversidad, se destaca una mayor participación de países como Argentina y de Ecuador dentro de la región, con la colaboración internacional de países como Estado Unidos, Reino Unido y Alemania. El mismo Sánchez-Perdomo et al. (2017), establece la participación y colaboración de la comunidad internacional para el desarrollo de la investigación y señala que es importante la selección editorial que poseen estas revistas de alto impacto de la comunidad internacional para el desarrollo de investigación en Latinoamérica.

El análisis de la literatura científica sobre la aplicación de la teledetección en el estudio de procesos ecológicos, ambientales y de biodiversidad indica un creciente uso de herramientas tecnológicas en este campo de investigación en los últimos años. En particular, se observa un aumento significativo en el empleo de indicadores e índices espaciales. Este análisis ha permitido identificar una amplia variedad de indicadores utilizados en la teledetección, lo cual fue fundamental para el desarrollo de la presente investigación, garantizando así el uso de indicadores que han demostrado su eficacia en la práctica en otros países de la región.

El filtrado de los indicadores resultó fundamental para obtener un conjunto de indicadores ecológicos espaciales útiles en el monitoreo de la restauración de paisajes. La reducción de 219 a 19 indicadores resalta la importancia de estandarizar nombres y definiciones, y de enfocar el análisis en índices espectrales. Este proceso es coherente con la literatura que subraya la necesidad de seleccionar indicadores sólidos y relevantes para el monitoreo de la restauración (Ruiz-Jaen y Aide, 2005).

La eliminación de indicadores redundantes, junto con el descarte de aquellos que no se relacionaban con la temática espacial, permitió concentrar el análisis en un conjunto más manejable y relevante. Esto es especialmente importante dado que la diversidad de indicadores en la literatura puede conducir a confusiones en su aplicación (Turner y Gardner, 2015).

7.2. Interpretación de la validación de indicadores

- ***Calificación y análisis de indicadores***

Los resultados obtenidos en la calificación de los indicadores ecológicos presentan una clara diferenciación en cuanto a su aplicación para el monitoreo espacial de la restauración de paisajes. Los indicadores que se destacan en el nivel de aplicación “muy alta” son NDVI, el AVI y el EVI con promedios de 4,23, 4,04 y 4,03 respectivamente. Tanto el NDVI como el EVI han sido ampliamente validados en estudios previos y su relevancia en la evaluación de la vegetación es indiscutible, especialmente en estudios de restauración ecológica a gran escala, luego de perturbaciones extremas como incendios forestales (Sagynbayeva et al., 2023).

El NDVI se destaca como el indicador más aplicable para el análisis de la salud de la vegetación, con una calificación promedio de 4,23 y una alta frecuencia de uso (31 menciones). Su confiabilidad, respaldada por su desempeño consistente en los criterios evaluados, lo

posiciona como una herramienta eficaz en diversas aplicaciones, obteniendo la puntuación máxima de 5 en los ítems A, B, C, D y E. Además, su uso extendido en el análisis de la dinámica de la vegetación se fundamenta en su trayectoria confiable y en la disponibilidad de conjuntos de datos globales, como el del Sistema de Monitoreo y Modelado de Inventario Global (GIMMS), que abarca el período de 1982 a 2022. Este índice ha demostrado ser particularmente útil para monitorear la recuperación y el estrés de la vegetación bajo diferentes condiciones ambientales, incluidas perturbaciones como incendios forestales y deforestación (Li et al., 2023).

Aunque el NDVI es ampliamente valorado por su efectividad, también presenta limitaciones que deben considerarse cuidadosamente, ya que pueden introducir cierto grado de incertidumbre en los análisis. Una de las principales limitaciones es el fenómeno de saturación, que se produce cuando la reflectancia alcanza un umbral en el que el índice pierde sensibilidad para detectar variaciones en el entorno y la biomasa, especialmente cuando estas variables alcanzan niveles elevados (Huang et al., 2020; Abdelmajeed y Juszcak, 2024). Este problema es especialmente evidente en ecosistemas densamente vegetados, donde el NDVI puede subestimar los niveles de biomasa o actividad fotosintética (Mutanga y Skidmore, 2004)

El AVI, con un promedio de 4,04 y una frecuencia de 3, muestra una alta aplicabilidad en contextos donde se requiere mayor sensibilidad para detectar cambios en la cobertura vegetal. Destaca por su efectividad en la evaluación de distintas regiones geográficas, especialmente para monitorear cambios en la estructura de la vegetación asociados con proyectos de restauración ecológica (Deka et al., 2013). Su flexibilidad lo posiciona como una herramienta confiable en iniciativas de restauración a gran escala, así como en la gestión de recursos naturales y estudios sobre cambio climático.

Si bien el AVI tiene una menor frecuencia de uso en comparación con el NDVI y el EVI, se posiciona como una herramienta ideal para contextos específicos. Es particularmente efectivo en áreas con interferencia atmosférica moderada (a diferencia del EVI, que incluye correcciones atmosféricas avanzadas), ya que tiene una alta sensibilidad para el cálculo de la densidad forestal (Deka et al., 2013; Aigbokhan et al., 2020), donde las bandas roja e infrarroja cercana no sufren distorsiones significativas. Además, a comparación con el NDVI, que tiende a saturarse en ecosistemas densamente vegetados, el AVI permite una mejor diferenciación en niveles intermedios de biomasa, haciéndolo especialmente útil en regiones de transición entre ecosistemas densos y menos vegetados, como los ecotonos entre bosques y sabanas.

El EVI, con un promedio de 4,03 y una frecuencia de 9, se presenta como otro indicador altamente aplicable. La evaluación destaca su robustez en la detección de cambios en la vegetación, especialmente en áreas con alta densidad de vegetación o bajo estrés ambiental. Este indicador posee una sensibilidad en áreas de alta biomasa y supera al NDVI en su característica de saturarse con vegetación tropical, aunque en muchas ocasiones son complementarios para el monitoreo de la recuperación de la vegetación (Mancilla Ruiz et al., 2021; Zutta et al., 2023). Su contexto de utilización más adecuado en áreas densamente vegetadas y bajo condiciones atmosféricas variables gracias a sus correcciones adicionales, pero no necesariamente captura los cambios sutiles con la precisión del AVI (Huete et al., 2002).

- ***Limitaciones y oportunidades para investigaciones futuras***

A pesar de los avances en la identificación y validación de indicadores, existen limitaciones que deben ser abordadas. Por ejemplo, la precisión de los índices espectrales puede verse afectada por factores como la topografía y la nubosidad, lo que podría requerir ajustes en los modelos de monitoreo. Además, la integración de otros tipos de datos espaciales, como la estructura de la vegetación (a través de LIDAR o fotografía de precisión con drones), para complementar la información proporcionada por los índices espectrales es fundamental.

Por otro lado, es importante, el uso de nuevas técnicas, como el aprendizaje automático, para combinar múltiples fuentes de datos y corregir las limitaciones impuestas por factores externos, mejorando así la precisión en la estimación de variables biofísicas en ecosistemas complejos (Paluba et al., 2024).

7.3. Aplicación de indicadores

Los resultados reflejan cambios importantes en la cobertura vegetal en las áreas de estudio durante el periodo analizado. La presencia de anomalías negativas en varios puntos sugiere una posible degradación ambiental, disminución de parches de vegetación nativa, que puede estar asociadas a actividades antropogénicas como la agricultura, conversión de parches de bosque a pastizales o en su defecto a eventos naturales extremos como sequías o incendios forestales no provocados, tal como lo indican Lucio et al., (2023) y Maita Chamba, (2015), los cuales en sus diferentes investigaciones establecen que los valores mínimos de los índices de vegetación como el NDVI y EVI respectivamente, están influenciados por las

condiciones atmosféricas, problemas de nubosidad, precipitación y temperatura, determinando que los valores de estos índices pueden verse afectados en ciertos periodos del año.

La presente propuesta de aplicación de indicadores tiene como objetivo realizar el monitoreo de la restauración de paisajes en el norte del cantón Loja, mediante teledetección, específicamente en las cinco parcelas en áreas de investigación donde la UNL ha llevado a cabo procesos de restauración desde 2023. Sin embargo, este período de tiempo es relativamente corto para evaluar de manera efectiva el impacto de dichas acciones, ya que, como señala Chazdon (2008) los procesos deforestación o degradación ocurren de manera rápida, más la restauración de bosques y paisajes suele producirse durante períodos mucho más prolongados, que podrían abarcar desde años hasta décadas. Por este motivo se optó por enfocarlo como un diagnóstico de línea base de un periodo de 28 años atrás. Además de resaltar que ya existían ciertas actividades de conservación y/o restauración anteriores como el abandono de actividades agropecuarias y actividades experimentales de restauración.

En cuanto a las diferencias entre los indicadores aplicados, es importante destacar que, aunque todos reflejan una tendencia similar en términos de anomalías, el EVI y AVI muestran una mayor sensibilidad a áreas de vegetación densa, mientras que el NDVI, siendo más general, podría subestimar algunos cambios en áreas con vegetación muy densa o suelos descubiertos. Esto refuerza la importancia de utilizar varios índices para evaluar de manera más precisa los cambios en la vegetación.

Al comparar los resultados de NDVI con lo propuesto por Gutiérrez-Barrientos et al. (2022) para evaluar la degradación de la vegetación, se observó que los valores puntuales de este índice permiten evaluar con claridad el vigor de la vegetación, diferenciando entre plantas vivas y muertas. Al analizar conjuntamente los tres índices (NDVI, EVI y AVI), se encontraron tendencias similares en la mayoría de las áreas de estudio. Sin embargo, el EVI demostró una mayor sensibilidad a los cambios en vegetación densa, lo cual coincide con los hallazgos de Huete et al. (2002), que concluyen que el EVI es más eficaz que el NDVI en entornos con alta densidad de biomasa debido a su menor susceptibilidad a la saturación en estas condiciones e incorpora correcciones atmosféricas y del efecto del dosel. Por otro lado, el AVI muestra una mayor importancia en la ponderación a la banda infrarroja cercana, así como lo afirma Castillo-Negro y Martínez-Casanovas, (2005), y puede que esto influya en la sobreestimación de la respuesta de la vegetación sana.

Estas diferencias pueden explicar las características específicas de cada uno de los índices aplicados y por las condiciones ambientales de las distintas áreas de estudio. Finalmente, los resultados de la presente investigación en la aplicación de los índices de vegetación (NDVI, AVI y EVI) utilizados para monitorear la dinámica de la vegetación permiten realizar el monitoreo de la restauración; el uso de estos índices aplicados y del listado de los indicadores propuestos, dependerán de las características específicas del área de estudio y de los objetivos de la investigación y de la misma manera los resultados tendrán que ser manejados con monitoreos en campo mediante el establecimiento de puntos de control.

El análisis de las anomalías de los índices de vegetación (NDVI, AVI y EVI), los resultados obtenidos del test de Mann-Kendall y el estimador Theil-Sen, aportan con una visión más detallada de las tendencias en las áreas monitoreadas, donde se manifiestan diferencias en la magnitud y significancia de estas tendencias:

- Variación entre sectores: Akakana, Masaca y Guaguelpamba presentan tendencias significativamente crecientes en NDVI y EVI, mientras que en AVI las tendencias son significativas únicamente en Masaca y Guaguelpamba, destacando una mayor heterogeneidad en este índice. Por otro lado, La Argelia y La Aguangora muestran tendencias positivas no significativas en AVI y EVI, aunque ambas áreas presentan resultados consistentes y significativos en NDVI. Estas diferencias pueden atribuirse a factores locales como la cobertura de suelo, intervenciones específicas en cada sector o variaciones en las condiciones climáticas que afectan la recuperación de la vegetación y su densidad.
- Comparación de índices: El NDVI continúa siendo el índice con las tendencias más consistentes y significativas en todas las áreas. Su sensibilidad a la biomasa total lo hace ideal para evaluar el progreso general de la vegetación, particularmente en regiones con cobertura vegetal en aumento. Por otro lado, el AVI, aunque muestra una respuesta más moderada, parece captar dinámicas específicas relacionadas con estructuras vegetales y condiciones locales. Su menor sensibilidad a las variaciones generales podría explicar la falta de significancia en algunos sectores. El EVI, por su parte, muestra una respuesta intermedia, destacándose en áreas densamente vegetadas como Guaguelpamba, donde es más eficaz gracias a su capacidad para corregir saturaciones y efectos atmosféricos.

8. Conclusiones

- Dentro de los países que más investigaciones científicas realizan con respecto al tema de indicadores ecológicos a nivel espacial en los trópicos de América, se destacan Estados Unidos en primer lugar (sin ser de la región), seguidamente de Brasil y México como representantes latinoamericanos.
- El proceso de validación de indicadores muestra que el NDVI, AVI y EVI son los más adecuados para el monitoreo de la restauración de paisajes. Su alta efectividad los posiciona como indicadores clave para la evaluación y seguimiento de la salud de los ecosistemas, permitiendo una comprensión más precisa de los cambios en la vegetación y las dinámicas de restauración. Sin embargo, el uso de listado total de la propuesta de 19 indicadores puede ser viable según el sitio, el ecosistema y/o las condiciones ambientales del sitio de investigación.
- Las aplicaciones de indicadores en las áreas de estudio, en cuanto a anomalías, muestran una degradación ambiental y pérdida de vegetación nativa durante el lapso estudiado (especialmente en los primeros años), posiblemente causada por actividades humanas como la agricultura y la conversión de bosques a otros usos de suelo, o por eventos naturales extremos naturales.
- De acuerdo al análisis general de tendencias en las áreas de estudio existe un ligero aumento del NDVI, lo que indica un incremento gradual en la cobertura vegetal y por ende en su actividad fotosintética, lo que muestra una ligera recuperación de la vegetación, en algunas partes de las áreas de estudio, conforme fueron avanzando los años. En el caso de AVI y EVI, aunque existen ciertas variaciones, la mayoría de tendencias son en su mayoría con enfoque al alza.

9. Recomendaciones

- Realizar futuros análisis sistemáticos de literatura científica tomando en cuenta otras latitudes del trópico a nivel mundial para reafirmar si los índices que destacan en este estudio son adecuados en todo contexto espacial.
- Para el monitoreo de la restauración a largo plazo, es importante evaluar la sostenibilidad de los esfuerzos de restauración e identificar posibles desafíos o resultados inesperados, donde la aplicación de la teledetección y la aplicación de indicadores espaciales son importantes para realizar esta evaluación.
- Es importante combinar datos de teledetección con la aplicación de los indicadores espaciales y de la misma manera realizar una combinación con monitoreos y levantamiento de información en campo (biológicos y socioeconómicos), con la finalidad de mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados del monitoreo.
- Para complementar la información proporcionada por la aplicación de los indicadores mejores calificados (NDVI, EVI y AVI) se podría integrar otros tipos de datos espaciales, como la estructura de la vegetación. Esta combinación ofrecería un análisis más completo y detallado del estado de los ecosistemas, mejorando la precisión en el monitoreo de la restauración de paisajes y proporcionando una visión más holística de los procesos ecológicos.
- Los resultados presentados pueden ser aplicados en las diferentes regiones del Ecuador y de los trópicos de América, por lo que es importante realizar el desarrollo de programas de capacitación para equipar a los actores locales, equipos técnicos, con las habilidades necesarias para recopilar y analizar los diferentes resultados de la aplicación de los monitoreos, con la finalidad que sea aplicable en la toma de decisiones por parte de autoridades y de las entidades con las competencias de realizar proyectos de restauración a nivel nacional.

10. Bibliografía

- Abdelmajeed, A. Y. A., y Juszczak, R. (2024). Challenges and Limitations of Remote Sensing Applications in Northern Peatlands: Present and Future Prospects. *Remote Sensing*, 16(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs16030591>
- Adams, J. (2005). Early citation counts correlate with accumulated impact. *Scientometrics*, 63(3), 567-581. <https://doi.org/10.1007/s11192-005-0228-9>
- Aigbokhan, O. J., Pelemo, O. J., Agbor, C. F., y Adamu, I. S. (2020). Forest canopy density analysis of Sokpomba Forest Reserve, Edo State. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 12(4), Article 4.
- Aronson, J., Milton, S., Blignaut, J., y Raven, P. (2007). Restoring natural capital: Science, business, and practice. *Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*.
- Castillo Negro, J., y Martínez-Casanovas, J. A. (2005). Análisis de la recuperación de la cubierta vegetal en los municipios de Pinós y Torá tras el incendio de 1998 mediante el tratamiento multitemporal de imágenes de satélite Landsat ETM+. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19, 41-45.
- Chazdon, R. (2008). Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science (New York, N.Y.)*, 320, 1458-1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>
- Chen, C. (2022). *How to Use CiteSpace*. 149.
- Danielle I. Rappaport, Leandro R. Tambosi, y Metzger, J. P. (2015). A landscape triage approach: Combining spatial and temporal dynamics to prioritize restoration and conservation. *Journal of Applied Ecology*, 52(3), 590-601. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12405>

- Deka, J., Tripathi, O. P., y Khan, M. L. (2013). Implementation of Forest Canopy Density Model to Monitor Tropical Deforestation. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(2), 469-475. <https://doi.org/10.1007/s12524-012-0224-5>
- Eskandari Damaneh, H., Eskandari Damaneh, H., Sayadi, Z., y Khorani, A. (2021). Evaluation of spatiotemporal changes and correlations of aerosol optical depth, NDVI and climatic data over Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4), 772-786. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125252>
- FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360es>
- Fensholt, R., y Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.07.002>
- GAD Municipal de Loja. (2021a). *Diagnostico General PDOT Municipal de Loja*.
- GAD Municipal de Loja. (2021b). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial | Municipio de Loja*. <https://www.loja.gob.ec/contenido/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial>
- Gamon, J. A., Field, C. B., Bilger, W., Björkman, O., Fredeen, A. L., y Peñuelas, J. (1990). Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia*, 85(1), 1-7. <https://doi.org/10.1007/BF00317336>
- Gamon, J. A., y Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143(1), 105-117. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x>
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., y Dixon, K. W. (2019a). International principles and standards for the

- practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46.
<https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., y Dixon, K. W. (2019b). *PRINCIPIOS Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES PARA LA PRÁCTICA DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA (SEGUNDA EDICIÓN)*.
https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/Spanish_SER_International_St.pdf
- Gante, G., Sosa-Gonzalez, W.-E., Bautista-Ortega, J., Castillo, E., y Fernández, A. (2020). *Escala de Likert: Una alternativa para elaborar e interpretar un instrumento de percepción social*.
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gitelson, A. A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165-173.
<https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., y Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76-87.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gitelson, A. A., y Merzlyak, M. N. (1996). Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148(3), 494-500. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80284-7)

- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., y Lichtenthaler, H. K. (1996). Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, 148(3), 501-508. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9)
- Guerrero Rubio, J. P., Tasambay Salazar, A., Cofre Santos, F., Jácome Segovia, C. S., Valverde Lara, C. R., y Jiménez Rojas, Y. (2020). Evaluación y restauración ecológica "Lisan Wasi" comunidad San Pedro, parroquia Tarqui, Cantón Pastaza. *Revista Ciencia y Tecnología*, 13(1 (January-June 2020)), 17-25.
- Gutiérrez-Barrientos, M., Marín-Solís, J. D., Alanís-Rodríguez, E., Buendía-Rodríguez, E., Gutiérrez-Barrientos, M., Marín-Solís, J. D., Alanís-Rodríguez, E., y Buendía-Rodríguez, E. (2022). Evaluación de una restauración mediante dron en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica*, 54, 71-85. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.5>
- Holl, K. D., y Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558-1563. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J., Wang, Y., y Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., y Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., y van Leeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440-451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- IEE, y MAGAP. (2013). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25000. Memoria Técnica—Cantón Loja*. https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/loja/mt_loja_sistemas_productivos.pdf
- Jiménez-Moreno, M. J., Laguna, R. R., Maurice, M. J. E., Zarate, R. R., y Sandoval, O. A. A. (2019). Análisis de indicadores ambientales espacio-temporales de agua, suelo y vegetación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1641-1652. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1806>
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50(4), 663-666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Key, C., y Benson, N. (1999). *Measuring and remote sensing of burn severity: The CBI and NBR*.
- Kulawardhana, R., y Jones, H. (2011). Remote sensing of vegetation: Principles, techniques and applications. By Hamlyn G. Jones and Robin A Vaughan. *Journal of Vegetation Science*. https://www.academia.edu/18119014/Remote_sensing_of_vegetation_principles_techniques_and_applications_By_Hamlyn_G_Jones_and_Robin_A_Vaughan
- Lambin, E., y Geist, H. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (Vol. 18). <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Landsat Missions | U.S. Geological Survey*. (s. f.). Recuperado 5 de octubre de 2024, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Li, M., Cao, S., Zhu, Z., Wang, Z., Myneni, R. B., y Piao, S. (2023). Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS

- NDVI) from 1982 to 2022. *Earth System Science Data*, 15(9), 4181-4203.
<https://doi.org/10.5194/essd-15-4181-2023>
- Locher-Krause, K. E., Volk, M., Waske, B., Thonfeld, F., y Lautenbach, S. (2017). Expanding temporal resolution in landscape transformations: Insights from a landsat-based case study in Southern Chile. *Ecological Indicators*, 75, 132-144.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.036>
- Lucio, M. V., Colcha, D. C., Cutiupala, G. A., y Puente, L. M. O. (2023). Monitoreo de la vegetación del páramo mediante la intersección de los índices ndvi y evi de la microcuenca del río Cebadas, provincia de Chimborazo, periodo 2021. *Dominio de las Ciencias*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.23857/dc.v9i4.3632>
- MAATE. (2022). *Reporte de avances (fecha de corte: Diciembre 2022)—Implementación de la agenda 2030 en el Ecuador*. Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador.
https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/11/Matriz_consolidada-ODS-2023.pdf
- Maita Chamba, J. A. (2015). *Dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador*. [bachelorThesis, Universidad del Azuay].
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4933>
- Mancilla Ruiz, D., De la Barrera, F., González, S., y Huaico Malhue, A. (2021). The Effects of a Megafire on Ecosystem Services and the Pace of Landscape Recovery. *Land*, 10, 1388.
<https://doi.org/10.3390/land10121388>
- Mazón, M., Aguirre, N., Echeverría, C., y Aronson, J. (2019). Monitoring attributes for ecological restoration in Latin America and the Caribbean region. *Restoration Ecology*, 27(5), 992-999. <https://doi.org/10.1111/rec.12986>

- Méndez Toribio, M., Martínez, C., Ceccon, E., y Guariguata, M. R. (2017). Planes actuales de restauración ecológica en Latinoamérica: Avances y omisiones. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 1-30.
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal 2019—2030*.
- Montoya, D. (2019). The restoration of ecological networks: Spatial and temporal scales, stability and global change. *Ecosistemas*, 28(2), 11-19.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.1706>
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., y Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: Definición y nociones básicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 11(3), 184-186. <https://doi.org/10.4067/S0719-01072018000300184>
- Mostafavi, N., Zehtabian, G., Azarnivand, H., Keshtkar, H., y Khosravi, H. (2024). Quantitative study of spatiotemporal changes in ecology to monitor land degradation in Alborz Province. *Desert*, 29(1), 21-36. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2024.97915>
- Mutanga, O., y Skidmore, A. K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 3999-4014. <https://doi.org/10.1080/01431160310001654923>
- NCI, E. (2023, junio 28). Conservar las fuentes de agua. *Naturaleza y Cultura Internacional » Pasión por la diversidad biológica y cultural*.
<https://www.natureandculture.org/es/directorio/conservar-las-fuentes-de-agua/>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la

- publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Paluba, D., Saux, B., y Stych, P. (2024). *Estimating Optical Vegetation Indices and Biophysical Variables for Temperate Forests with Sentinel-1 SAR Data using Machine Learning Techniques: A Case Study for Czechia*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07537>
- Pardal-Refoyo, J. L. (2020). *Anotaciones para estructurar una revisión sistemática = Annotations to structure a systematic review*.
- Pavao-Zuckerman, M. (2015). F. R. Adler and C. J. Tanner: Urban Ecosystems: Ecological Principles for the Built Environment. *Landscape Ecology*, 30(5), 955-957. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0186-4>
- Penuelas, J., Frederic, B., y Filella, I. (1995). Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. *Photosynthetica*, 31, 221-230.
- Pinty, B., y Verstraete, M. M. (1992). GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101(1), 15-20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>
- Porcel Rodríguez, L. (2017). *ESTUDIO Y PROPUESTA DE UN SISTEMA DE INDICADORES DE PAISAJE Study and proposal of a system of landscape indicators* [Tesis, Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/48042>
- Porcel-Rodríguez, L. (2017). *Estudio y propuesta de un sistema de indicadores de paisaje* [Tesis de doctorado, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/48042>
- Roberts, D. A., Numata, I., Holmes, K., Batista, G., Krug, T., Monteiro, A., Powell, B., y Chadwick, O. A. (2002). Large area mapping of land-cover change in Rondônia using multitemporal spectral mixture analysis and decision tree classifiers. *Journal of*

Geophysical Research: Atmospheres, 107(D20), LBA 40-1-LBA 40-18.

<https://doi.org/10.1029/2001JD000374>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., y Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In Third ERTS Symposium, Vol. 1*, 309-317.

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.e., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

Ruiz-Jaen, M., y Aide, T. M. (2005). Restoration Success: How Is It Being Measured? *Restoration Ecology - RESTOR ECOL*, 13, 569-577. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00072.x>

Sagynbayeva, A., Mambetov, B., Boranbay, Z., Borissenko, Y., Baigazakova, Z., y Turlybekov, K. (2023). *Assessing pine forest restoration post-fire using NDVI and GIS technologies*. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180620>

Sánchez-Perdomo, R., Rosario-Sierra, M., Herrera-Vallejera, D., Rodríguez-Sánchez, Y., Carrillo-Calvet, H., Sánchez-Perdomo, R., Rosario-Sierra, M., Herrera-Vallejera, D., Rodríguez-Sánchez, Y., y Carrillo-Calvet, H. (2017). Revisión bibliométrica de las Ciencias de la Información en América Latina y el Caribe. *Investigación bibliotecológica*, 31(SPE), 79-100. <https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2017.nesp1.57886>

Sierra, R., Calva, O., y Guevara, A. (2021). *La Deforestación en el Ecuador, 1990-2018. Factores promotores y tendencias recientes. Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador, Ministerio de Agricultura del Ecuador, en el marco de la implementación del Programa Integral Amazónico de Conservación de Bosques y Producción Sostenible*. (p. 216 pp.)

- [Consultoria]. https://www.proamazonia.org/wp-content/uploads/2021/06/Deforestacio%CC%81n_Ecuador_com2.pdf
- Solórzano Villegas, J. V., y Perilla Suárez, G. A. (2022). *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/36058>
- Suding, K., Higgs, E., Palmer, M., Callicott, J. B., Anderson, C. B., Baker, M., Gutrich, J. J., Hondula, K. L., LaFevor, M. C., Larson, B. M. H., Randall, A., Ruhl, J. B., y Schwartz, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348(6235), 638-640. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4216>
- Turner, M. G., y Gardner, R. H. (2015). Landscape Dynamics in a Rapidly Changing World. En M. G. Turner y R. H. Gardner (Eds.), *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process* (pp. 333-381). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4_9
- UICN y WRI. (2014). *Guía sobre la Metodología de evaluación de oportunidades de restauración (ROAM): Evaluación de las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional*. (p. 125 pp.). <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-030-Es.pdf>
- UNL. (2023). *UNL reforestará 500 hectáreas de tierra en Loja*. Universidad Nacional de Loja. <https://unl.edu.ec/noticia/unl-reforestara-500-hectareas-de-tierra-en-loja>
- Van Eck, N. J., y Waltman, L. (2023). *VOSviewer Manual*. 54.
- Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., y Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
- Yusuf, A., Okon, C., Oche, C., Agbo, E., Umar Alhaji, U., Yusuf, A., Edet, C., Oche, C., y Agbo, E. (2018). *Trend Analysis of Temperature in Gombe State Using Mann Kendall Trend Test*

Effect of Natural Dye Co-Sensitization on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) Based on Anthocyanin and Betalain Pigments Sensitisation View project FABRICATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSCs) USING ANTHOCYANIN AND BETALAIN PIGMENTS AS DYE SENSITISER View project Trend Analysis of Temperature in Gombe State Using Mann Kendall Trend Test.

Zhao, Y.-Y. (2021). Análisis de dominios científicos de la investigación de la traducción de obras de Mo Yan en China a través de Citespace. *Hikma*, 20(1), 275-305. <https://doi.org/10.21071/hikma.v20i1.13089>

Zutta, B., Salinas, N., Cosio, E., Tito, R., Aragon, S., Nina-Quispe, A., y Roman-Cuesta, R. M. (2023). Satellite-derived forest canopy greenness shows differential drought vulnerability of secondary forests compared to primary forests in Peru. *Environmental Research Letters*, 18. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc8ea>

11. Anexos

Anexo 1. Modelo de matriz formato excel de revisión para la literatura científica

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	L	O	P	Q	R	S	T	U	V	W*	X*	Y*
AR1																							Indicador1	Indicador2	Indicador_n...
AR2																							Indicador1	Indicador2	Indicador_n...
AR3																							Indicador1	Indicador2	Indicador_n...
ARn...																							Indicador1	Indicador3	Indicador_n...

Donde cada columna tiene el siguiente detalle:

A	Encabezado: Cód.
	Descripción: Código de artículo

B	Encabezado: Author
	Descripción: Autor (es) de la publicación científica

C	Encabezado: Year
	Descripción: Año de publicación

D	Encabezado: Title
	Descripción: Título principal de la publicación científica

E	Encabezado: Journal
	Descripción: Revista donde se publico

F	Encabezado: Type
	Descripción: Se refiere al tipo de publicación. Se debe escoger una opción de las siguientes predeterminadas. <ul style="list-style-type: none"> • Artículo de revisión

	<ul style="list-style-type: none"> • Original • Guía • Respuesta a opiniones
G	<p>Encabezado: Method of analysis</p> <p>Descripción: Es el proposito del estudio. Se debe escoger una opción de las siguientes predeterminadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exploratorio: simplemente describe el estado del arte, sin implicar relaciones entre variables • Correlacional: relación entre variables, sin llegar a demostrar causalidad • Explicativo: implica demostrar causalidad • Predictivo: implica uso de modelos para predecir comportamiento de un fenómeno o patrones • Mixto: usa varios enfoques
H	<p>Encabezado: Purpose of the study</p> <p>Descripción: Se refiere al objetivo del estudio</p>
I	<p>Encabezado: Macroecosystem</p> <p>Descripción: Este campo debe llenarse usando guion bajo “_” para separar palabras dentro del ecosistema, y “;” para separar entre ecosistemas. Se realizará copy/paste directo</p>
J	<p>Encabezado: Ecosystem category</p> <p>Descripción: Este campo debe llenarse usando guion bajo “_” para separar palabras dentro del ecosistema, y “;” para separar entre ecosistemas. Se realizará copy/paste directo</p>
K	<p>Encabezado: Country</p> <p>Descripción: País donde se desarrolló la investigación</p>
L	<p>Encabezado: Type of perturbation</p> <p>Descripción: Cuál fue el disturbio anterior. Ejemplos: pastos abandonados, incendios, minería, tala rasa, monocultivo</p>
M	Encabezado: Monitoring type

	<p>Descripción: Se debe escoger una opción de las siguientes predeterminadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cross-sectional: muestran una fotografía en el tiempo. ejem: evaluación de recuperación a los 15 años • Longitudinal: muestran diferentes mediciones en el tiempo. ejem: recuperación de la restauración en 10 y 20 años
N	<p>Encabezado: Evaluation time years</p> <p>Descripción: Si el estudio evalúa la restauración luego de tres años de recuperación, se escribe el número 3. Si es longitudinal se escribe los años de monitoreo separados por “;”.</p>
O	<p>Encabezado: Longitudinal periodicity years</p> <p>Descripción: Se indica cada cuántos años se evaluó. Ejemplo: 2; 3; 6</p>
P	<p>Encabezado: Plot size (ha)</p> <p>Descripción: Tamaño de parcela, en caso que aplique.</p>
Q	<p>Encabezado: Lat</p> <p>Descripción: Latitud de ubicación de la investigación en coordenadas geográficas</p>
R	<p>Encabezado: Long</p> <p>Descripción: Longitud de ubicación de la investigación en coordenadas geográficas</p>
S	<p>Encabezado: Nº plots</p> <p>Descripción: Número de parcelas o áreas de investigación en campo.</p>
T	<p>Encabezado: Rest type</p> <p>Descripción: Se determina si se trata de restauración activa o pasiva.</p>
U	<p>Encabezado: Indicator type</p> <p>Descripción: Se refiere al tipo de indicador. Ejemplos: espacial, socioeconómico, florístico, faunístico, etc.</p>

* A partir de la columna W, se coloca el nombre de los indicadores identificado.

Anexo 2. Script para cálculo de indicadores (índices espectrales) en GEE (NDVI, AVI, EVI)

```
// ANALISIS MULTITEMPORAL DE INDICES DE VEGETACION PARA MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN //
//
//          UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
//      CENTRO DE INVESTIGACIONES TROPICALES DEL AMBIENTE Y BIODIVERSIDAD (CITIAB)
// AUTORES: - ING. CARLOS BURNEO (UNL)
//          - ING. FERNANDO TORRES (UNL)
// ASESORES: - M. Sc. JUAN MAITA (UNL)
//           - M. Sc. ERICK ANGAMARCA (UNL)

//////////////////// Pasos Previos //////////////////////////////////////

// Filtro anual promedio para cálculo de índices espectrales
var fechaInicio = ee.Number(1996); // Ajusta la fecha de inicio según sea necesario
var fechaFinal = ee.Number(2023); // Ajusta la fecha final según sea necesario
// Convertir fechas de inicio y final a valores enteros
var yearStart = fechaInicio.getInfo();
var yearEnd = fechaFinal.getInfo();
// Crear variable con el polígono de interés
var areaDeInteres = ee.FeatureCollection('users/carlosburneo/Poligonos/Cerro_Akakana');
// Seleccionar el índice espectral a utilizar
var indiceSeleccionado = 'NDVI'; // Cambia a 'NDVI' , 'EVI' o 'AVI' según sea necesario
// Función para agregar polígono de interés sin relleno
var empty = ee.Image().byte();
var outline = empty.paint({
  featureCollection: areaDeInteres,
  width: 2
});
// Agregar polígono sin relleno
Map.addLayer(outline, {palette: "black"}, "Polígono de interés");

//////////////////// CREAR MOSAICO POR AÑO //////////////////////////////////////

// Función para enmascarar nubes en una imagen de Landsat 9
function enmascararNubesL9(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var mask = qa.bitwiseAnd(1 << 1).
eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1 << 2).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 <<
4).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
}

// Función para enmascarar nubes en una imagen de Landsat 8
function enmascararNubesL8(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var mask = qa.bitwiseAnd(1 << 1).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1 << 2).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 <<
3).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
}
```

```

// Función para enmascarar nubes en una imagen de Landsat 7
function enmascararNubesL7(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var mask = qa.bitwiseAnd(1 << 1).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
}

// Función para corregir el bandeo en imágenes Landsat 7
function corregirBandeadoL7(image) {
  // Identifica los píxeles con valores faltantes o corruptos (donde no hay datos)
  var mask = image.mask().not();
  // Usa dilatación morfológica para rellenar solo los espacios faltantes (bandeado)
  var filled = image.focal_mean(4, 'square', 'pixels').updateMask(mask);
  // Combina la imagen original con la imagen corregida
  return image.unmask(filled);
}

// Función para enmascarar nubes en una imagen de Landsat 5
function enmascararNubesL5(image) {
  var qa = image.select('QA_PIXEL');
  var mask = qa.bitwiseAnd(1 << 1).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0)).and(qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
}

// Función de escalado de valores a reflectancia
var scaleFunc = function(image){
  // Sacar valores de acuerdo a la descripción de los datos
  // Scale es el valor por el que hay que multiplicar los datos
  // Offset es el valor que hay que sumarle a los datos
  var resul = ee.Image(image).multiply(0.0000275)
    .add(-0.2);
  return resul;
};

// Función para renombrar las bandas de Landsat 8 y 9, y convertirlas a tipo Float
function renombrarBandasL98(image) {
  return image.select(['SR_B5', 'SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'], ['nir', 'red', 'green', 'blue'])
    .multiply(1.0).toFloat(); // Convertir a Float
}

// Función para renombrar las bandas de Landsat 7 y 5, y convertirlas a tipo Float
function renombrarBandasL75(image) {
  return image.select(['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1'], ['nir', 'red', 'green', 'blue'])
    .multiply(1.0).toFloat(); // Convertir a Float
}

```

```

// Lista para almacenar las imágenes compuestas
var listImágenesCompuestas = [];

// Bucle para procesar cada año
for (var year = yearStart; year <= yearEnd; year++) {
  var startDate = year + '-01-01';
  var endDate = year + '-12-31';

  // Filtrar la colección de imágenes para el año específico y el área de interés
  var collectionL9 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2')
    .filterBounds(areaDeInteres)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 100)
    .map(enmascararNubesL9)
    .map(renombrarBandasL98);
  var collectionL8 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
    .filterBounds(areaDeInteres)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 100)
    .map(enmascararNubesL8)
    .map(renombrarBandasL98);
  var collectionL7 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2')
    .filterBounds(areaDeInteres)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 100)
    .map(enmascararNubesL7)
    .map(corregirBandeadoL7)
    .map(renombrarBandasL75);
  var collectionL5 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2')
    .filterBounds(areaDeInteres)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 100)
    .map(enmascararNubesL5)
    .map(renombrarBandasL75);

  // Unir las colecciones de Landsat 9, 8, 7, y 5
  var filteredCollection = collectionL9.merge(collectionL8).merge(collectionL7).merge(collectionL5);

  // Crear una imagen compuesta usando la mediana de las imágenes filtradas
  var composite = filteredCollection.median().clip(areaDeInteres);

  // Establecer la propiedad de tiempo para el inicio del año en milisegundos
  var date = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1);
  composite = composite.set('system:time_start', date.millis());

  // Agregar la imagen compuesta a la lista de imágenes compuestas
  listImágenesCompuestas.push(composite);

  // Agregar la imagen compuesta al mapa con una etiqueta que incluya el año
  Map.addLayer(composite, {bands: ['red', 'green', 'blue'],
    min: 8000, max: 15000, gamma: 1.5}, 'Composición RGB ' + year, false);
}

```

```

// Convertir la lista de imágenes compuestas a una colección de imágenes en GEE
var listImágenesCompuestasEE = ee.List(listImágenesCompuestas);
var colecciónImágenesCompuestas = ee.ImageCollection.fromImages(listImágenesCompuestasEE);
print("colección de imágenes compuestas", colecciónImágenesCompuestas);

// Definir una función que calcule el índice espectral seleccionado de una imagen
var calcularIndice = function(image) {
  image = ee.Image(image);

  // Aplicar la función de escalado a las bandas
  var scaledImage = scaleFunc(image);

  // Seleccionar las bandas necesarias para los cálculos
  var blue = scaledImage.select('blue');
  var red = scaledImage.select('red');
  var nir = scaledImage.select('nir');

  // Calcular el índice seleccionado
  var indice;
  if (indiceSeleccionado === 'NDVI') {
    indice = nir.subtract(red).divide(nir.add(red)).rename('indice');
  } else if (indiceSeleccionado === 'EVI') {
    var G = 2.5;
    var C1 = 6;
    var C2 = 7.5;
    var L = 1;
    indice = nir.subtract(red)
      .divide(nir.add(red.multiply(C1)).subtract(blue.multiply(C2)).add(L))
      .multiply(G)
      .rename('indice');
  } else if (indiceSeleccionado === 'AVI') {
    indice = nir.multiply(ee.Image(1).subtract(red)).multiply(nir.subtract(red))
      .pow(1/3)
      .rename('indice');
  }

  // Retornar la imagen del índice con la propiedad de tiempo conservada
  return indice.set('system:time_start', image.get('system:time_start'));
};

// Aplicar la función calcularIndice a cada imagen en la lista de imágenes compuestas
var listImágenesIndice = listImágenesCompuestasEE.map(calcularIndice);

// Convertir la lista de imágenes con el índice a una colección de imágenes en GEE
var colecciónIndice = ee.ImageCollection.fromImages(listImágenesIndice);
print('colección de ' + indiceSeleccionado, colecciónIndice);

// Función para agregar una imagen al mapa con una etiqueta
var agregarImagenAlMapa = function(imagen, nombre) {
  var visualizacion = {
    min: 0.3,
    max: 0.7,

```

```

    palette: ['red', 'yellow', 'green']
  };
  Map.addLayer(imagen, visualizacion, nombre, false);
};

// Obtener la lista de fechas de las imágenes en la colección
var fechasImágenes = coleccionIndice.aggregate_array('system:time_start').getInfo();

// Bucle para agregar cada imagen al mapa
fechasImágenes.forEach(function(fecha) {
  // Obtener la imagen por su fecha
  var imagen = coleccionIndice.filterMetadata('system:time_start', 'equals', fecha).first();

  // Calcular el año a partir de la fecha
  var year = ee.Date(fecha).get('year').getInfo();

  // Agregar la imagen al mapa con el año en lugar del número de imagen
  agregarImagenAlMapa(imagen, 'Imagen ' + indiceSeleccionado + ' ' + year);
});

// Gráfico en la CONSOLA del Índice Promedio Anual
var graficoIndice = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: coleccionIndice,
  region: areaDelInteres,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 30,
  xProperty: 'system:time_start'
}).setOptions({
  title: indiceSeleccionado + ' Promedio Anual',
  vAxis: {title: indiceSeleccionado},
  hAxis: {title: 'Año', format: 'yyyy'},
  lineWidth: 1,
  pointSize: 3,
  series: {0: {color: '2e86c1'}}
});

// Imprimir el gráfico en la consola
print(graficoIndice);

// Crear una imagen multibanda a partir de la colección de imágenes del índice
var imagenMultibanda = coleccionIndice.toBands();

// Exportar la imagen multibanda a Google Drive
Export.image.toDrive({
  image: imagenMultibanda,
  description: 'Multibanda_' + indiceSeleccionado,
  folder: indiceSeleccionado + '_Export',
  region: areaDelInteres,
  maxPixels: 1e13,
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:32717'
});

```

```

// PANEL píxel por píxel
// Crear un panel para mostrar información y gráficas basadas en las coordenadas seleccionadas
var panel = ui.Panel({
  layout: ui.Panel.Layout.flow('vertical'),
  style: {width: '600px'}
});
var intro = ui.Panel([
  ui.Label({
    value: 'Explora los datos del ' + indiceSeleccionado,
    style: {fontSize: '20px', fontWeight: 'bold'}
  }),
  ui.Label('Haz clic en un punto dentro del área de estudio.')
]);
panel.add(intro);
var lonLabel = ui.Label();
var latLabel = ui.Label();
panel.add(ui.Panel([lonLabel, latLabel], ui.Panel.Layout.flow('horizontal')));
// Función para manejar clics en el mapa y mostrar gráficas de series temporales del índice
Map.onClick(function(coords) {
  lonLabel.setValue('Longitud: ' + coords.lon.toFixed(2));
  latLabel.setValue('Latitud: ' + coords.lat.toFixed(2));
  var point = ee.Geometry.Point([coords.lon, coords.lat]);
  var indiceChart = ui.Chart.image.series({
    imageCollection: coleccionIndice,
    region: point,
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    scale: 30
  }).setOptions({
    title: indiceSeleccionado + ' Medio Anual en el Punto Seleccionado',
    vAxis: {title: indiceSeleccionado},
    hAxis: {title: 'Año'},
    lineWidth: 1,
    pointSize: 3,
    series: {0: {color: '00FF00'}}
  });
  // Agregar la gráfica del índice al panel
  panel.widgets().set(2, indiceChart);
});
// Configura el cursor del mapa para indicar que es interactivo
Map.style().set('cursor', 'crosshair');
// Insertar el panel en la interfaz de usuario
ui.root.insert(0, panel);
// Centrar el mapa en el área de interés
Map.centerObject(areaDelInteres);

```

```

////////// CALCULO DE ANOMALÍAS DEL ÍNDICE ANUAL //////////
// Calcular la media y desviación estándar del índice para cada año
var meanIndice = coleccionIndice.mean();
var sdIndice = coleccionIndice.reduce(ee.Reducer.stdDev());
// Calcular las anomalías del índice
var calcularAnomaliaIndice = function(image) {
  var anomaly = image.subtract(meanIndice).rename('anomiaAbsoluta');
  var relativeAnomaly = anomaly.divide(meanIndice).rename('anomiaRelativa');
  var sdAnomaly = anomaly.divide(sdIndice).rename('anomiaSd');
  return image.addBands(anomaly).addBands(relativeAnomaly).addBands(sdAnomaly);
};
// Aplicar la función de cálculo de anomalías a cada imagen en la colección del índice
var coleccionAnomaliasIndice = coleccionIndice.map(calcularAnomaliaIndice);
// Asignar la colección de anomalías a la variable anomalies
var anomalies = coleccionAnomaliasIndice;
// Función para agregar una imagen al mapa con una etiqueta
var agregarImagenAlMapa = function(imagen, nombre) {
  Map.addLayer(imagen, {min: -1, max: 1, palette: ['FF0000', 'FFFFFF', '00FF00']}, nombre, false);
};
// Obtener la lista de fechas de las imágenes en la colección de anomalías del índice
var fechasImagenesAnomalias =
coleccionAnomaliasIndice.aggregate_array('system:time_start').getInfo();
// Bucle para agregar cada imagen de anomalías al mapa
fechasImagenesAnomalias.forEach(function(fecha) {
  // Obtener la imagen por su fecha
  var imagen = coleccionAnomaliasIndice.filterMetadata('system:time_start', 'equals', fecha).first();
  // Calcular el año a partir de la fecha
  var year = ee.Date(fecha).get('year').getInfo();
  // Agregar la imagen al mapa con el año en lugar del número de imagen
  agregarImagenAlMapa(imagen.select('anomiaAbsoluta'), 'Anomalia Absoluta ' +
indiceSeleccionado + ' ' + year);
  agregarImagenAlMapa(imagen.select('anomiaRelativa'), 'Anomalia Relativa ' + indiceSeleccionado
+ ' ' + year);
  agregarImagenAlMapa(imagen.select('anomiaSd'), 'Anomalia Desviaciones Estándar ' +
indiceSeleccionado + ' ' + year);
});
// Graficar las anomalías relativas del índice a lo largo del tiempo
var chart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: anomalies.select(['anomiaRelativa', 'anomiaSd']),
  region: areaDeInteres,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 250

```

```

}).setOptions({
  title: 'Anomalías relativas de ' + indiceSeleccionado,
  hAxis: {title: 'Año'},
  vAxis: {title: 'Anomalía relativa'},
  lineWidth: 1,
  pointSize: 3
});

// Imprimir el gráfico
print(chart);

// Visualizar las anomalías relativas del índice en el mapa
Map.addLayer(anomalies.select('anomalíaRelativa'), {min: -1, max: 1, palette: ['FF0000', 'FFFFFF', '00FF00']}, 'Anomalía Relativa ' + indiceSeleccionado);
Map.addLayer(anomalies.select('anomalíaSd'), {min: -1, max: 1, palette: ['FF0000', 'FFFFFF', '00FF00']}, 'Anomalía Sd ' + indiceSeleccionado);

// Exportar anomalía del índice
Export.image.toDrive({
  image: anomalies.select(['anomalíaAbsoluta', 'anomalíaRelativa', 'anomalíaSd']).toBands(), //
  description: 'Anomalía_' + indiceSeleccionado, // Nombre base del archivo de salida
  folder: "anomalía_" + indiceSeleccionado, // Carpeta de destino en Google Drive
  region: areaDeInteres.geometry().bounds(), // Región de interés
  scale: 30, // Escala en metros por pixel
  maxPixels: 1e13, // Máximo número de píxeles permitidos
  crs: 'EPSG:32717' // Proyección geográfica
});

// Calcular estadísticas resumidas del índice promedio anual
var stats = coleccionIndice.map(function(image) {
  var mean = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: areaDeInteres,
    scale: 30
  });
  var stdDev = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.stdDev(),
    geometry: areaDeInteres,
    scale: 30
  });
  var minMax = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.minMax(),
    geometry: areaDeInteres,
    scale: 30
  });
  return ee.Feature(null, {
    'date': image.date().format('YYYY-MM-dd'),
    'indice_mean': mean.get('indice'),
    'indice_stdDev': stdDev.get('indice'),
    'indice_min': minMax.get('indice_min'),
    'indice_max': minMax.get('indice_max')
  });
});

```

```

});
});
// Imprimir las estadísticas resumidas
print('Estadísticas resumidas del ' + indiceSeleccionado + ':', stats);
// Graficar el promedio, mínimo y desviación estándar del índice a lo largo del tiempo
var chart = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: stats,
  xProperty: 'date',
  yProperties: ['indice_mean', 'indice_min', 'indice_stdDev']
})
.setChartType('LineChart')
.setOptions({
  title: indiceSeleccionado + ' Promedio, Mínimo y Desviación Estándar Anual',
  hAxis: {title: 'Fecha', format: 'yyyy-MM-dd'},
  vAxis: {title: 'Valor'},
  lineWidth: 2,
  pointSize: 4,
  series: {
    0: {color: '2e86c1', lineWidth: 2, pointSize: 4, lineDashStyle: [0, 0]}, // Promedio
    1: {color: 'red', lineWidth: 2, pointSize: 4, lineDashStyle: [4, 4]}, // Mínimo
    2: {color: 'green', lineWidth: 2, pointSize: 4, lineDashStyle: [1, 1]} // Desviación Estándar
  },
  legend: {position: 'top'},
  curveType: 'function'
});
// Imprimir el gráfico
print(chart);
// Convertir la colección de características a una tabla
var statsTable = ee.FeatureCollection(stats);
// Ordenar la tabla por fecha ascendente
statsTable = statsTable.sort('date');
// Imprimir las estadísticas resumidas
print('Estadísticas Resumidas del ' + indiceSeleccionado + ':', statsTable);
// Exportar las estadísticas como CSV
Export.table.toDrive({
  collection: statsTable,
  description: 'Estadísticas_' + indiceSeleccionado,
  fileFormat: 'CSV'
});

```

Anexo 3. Script para el análisis de series temporales de anomalías estandarizadas en el software RStudio

```
##### ANALISIS ESTADITICO DE MANN-KENDALL Y TIELSEN #####  
  
# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA  
# CENTRO DE INVESTIGACIONES TROPICALES DEL AMBIENTE Y BIODIVERSIDAD (CITIAB)  
# AUTORES: - ING. CARLOS BURNEO (UNL)  
# - ING. FERNANDO TORRES (UNL)  
# ASESORES: - M. Sc. JUAN MAITA (UNL)  
- M. Sc. ERICK ANGAMARCA (UNL)  
  
##### Instala paquetes necesarios #####  
# (c("tseries", "trend", "terra", "raster", "Kendall", "ggplot2",  
# "car", "dplyr", "viridis", "tidyverse"))  
#librerias  
pacman::p_load(raster, Kendall, ggplot2, dplyr, terra, viridis, tidyverse)  
#variables editables  
inicio <- 1996  
fin <- 2023  
site <- "Guaguelpamba" #Argelia, Akakana, Masaca, Aguangora, Guaguelpamba  
index <- 'EVI' #AVI, EVI, NDVI  
# Actualización de la ruta base  
ruta_base <- "D:/Carlos Burneo/Desktop/INDICES_ESPECTRALES_por_zonas/raster" # Cambia de  
acuerdo a la ubicación de la carpeta que contenga los archivos tif.  
# Construcción de la ruta completa al archivo  
imagen <- rast(paste0(ruta_base, "/", site, "/", "Anomalia_", index, "_", site, ".tif"))#raster con bandas  
NDVI  
plot(imagen[[1]])  
# Verifica el número de bandas de la imagen multibanda  
num_bandas <- nlyr(imagen)  
num_bandas  
# Calcula una cadena de valores para calcular la mediana de cada imagen  
Median <- numeric(num_bandas)  
# Crea la función para calcular la mediana de cada banda  
for (i in 1:num_bandas) {  
  banda <- imagen[[i]]  
  valores <- values(banda, na.rm = TRUE)  
  Median[i] <- median(valores, na.rm = TRUE)  
}  
# Define los Years correspondientes  
Years <- seq(inicio, fin)  
# Crea un data frame con los promedios y Years  
df <- data.frame(Year = Years, Median = Median)  
# Crea una serie temporal  
serie_temporal <- ts(df$Median, start = inicio, frequency = 1)  
# Aplica la prueba de tendencia de Mann-Kendall
```

```
test_mk <- trend::mk.test(serie_temporal)

# Aplica la función sens.slope para calcular la pendiente
sens_slope <- trend::sens.slope(serie_temporal)
# Imprime los resultados
print(test_mk)
print(sens_slope)
# Ajusta un modelo lineal para la tendencia
modelo_lineal <- lm(Median ~ Year, data = df)
df$Trend <- fitted(modelo_lineal)
df$Polygon <- site
df$Index <- index
#guardar csv
write.csv(df, paste0("csv/", index, "_", site, "_ts.csv"))
```

Anexo 4. Matriz resumida de extracción de datos de literatura científica de la base de datos Scopus.

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR1	Aquino D.N.; Neto O.C.R.; Moreira M.A.; Teixeira A.S.; de Andrade E.M.	Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region	2018	Revista Ciencia Agronomica	17	10.5935/1806-6690.20180047
AR2	Neumann M.; Saatchi S.S.; Clark D.B.	Quantifying spatial and temporal dynamics of tropical forest structure using high resolution airborne lidar	2012	International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	4	10.1109/IGARSS.2012.6351207
AR3	Mancilla-Ruiz D.; de la Barrera F.; González S.; Huaico A.	The effects of a megafire on ecosystem services and the pace of landscape recovery	2021	Land	3	10.3390/land10121388
AR4	Corvalán P.; Galleguillos M.; Hernández J.	Presence, abundance and associability of <i>Citronella mucronata</i> in secondary forests dominated by <i>Nothofagus obliqua</i> in the foothills of Curicó, Maule region, Chile; [Presencia, abundancia y asociatividad de <i>Citronella mucronata</i> en bosques secundarios de <i>Nothofagus obliqua</i> en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile]	2014	Bosque	4	10.4067/S07192002014000300002
AR5	Portillo-Quintero C.; Hernandez-Stefanoni J.L.; Dupuy J.M.	Forest Clearing Dynamics and Its Relation to Remotely Sensed Carbon Density and Plant Species Diversity in the Puuc Biocultural State Reserve, Mexico	2023	Remote Sensing	0	10.3390/rs15133445
AR6	Nagler P.L.; Barreto-Muñoz A.; Chavoshi Borujeni S.; Jarchow C.J.; Gómez-Sapiens M.M.; Nouri H.; Herrmann S.M.; Didan K.	Ecohydrological responses to surface flow across borders: Two decades of changes in vegetation greenness and water use in the riparian corridor of the Colorado River delta	2020	Hydrological Processes	23	10.1002/hyp.13911
AR7	Chen N.; Tsendbazar N.-E.; Requena Suarez D.; Verbesselt J.; Herold M.	Characterizing aboveground biomass and tree cover of regrowing forests in Brazil using multi-source remote sensing data	2023	Remote Sensing in Ecology and Conservation	1	10.1002/rse2.328
AR8	Segura-Millán K.; Perez-Verdin G.	The effect of payments for ecosystem services on forest cover, land use, and capacity building in northern Mexico	2023	Trees, Forests and People	0	10.1016/j.tfp.2023.100387

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR9	Silva M.V.D.; Pandorfi H.; Oliveira-Júnior J.F.D.; Silva J.L.B.D.; Almeida G.L.P.D.; Montenegro A.A.D.A.; Mesquita M.; Ferreira M.B.; Santana T.C.; Marinho G.T.B.; Costa A.R.D.; Giongo P.R.	Remote sensing techniques via Google Earth Engine for land degradation assessment in the Brazilian semiarid region, Brazil	2022	Journal of South American Earth Sciences	5	10.1016/j.jsames.2022.104061
AR10	Gao Y.; Mas J.F.; Paneque-Galvez J.; Skutsch M.; Ghilardi A.; Navarrete Pacheco J.A.; Paniagua I.	Validation of MODIS vegetation continuous fields in two areas in Mexico	2014	3rd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, EORSA 2014 - Proceedings	2	10.1109/EORSA.2014.6927840
AR11	Schwartz N.B.; Uriarte M.; Defries R.; Bedka K.M.; Fernandes K.; Gutiérrez-Vélez V.; Pinedo-Vasquez M.A.	Fragmentation increases wind disturbance impacts on forest structure and carbon stocks in a western Amazonian landscape	2017	Ecological Applications	31	10.1002/eap.1576
AR12	Mu Y.; Biggs T.; Stow D.; Numata I.	Mapping heterogeneous forest-pasture mosaics in the Brazilian Amazon using a spectral vegetation variability index, band transformations and random forest classification	2020	International Journal of Remote Sensing	4	10.1080/2150704X.2020.1802529
AR13	Zwiener V.P.; Padial A.A.; Marques M.C.M.; Faleiro F.V.; Loyola R.; Peterson A.T.	Planning for conservation and restoration under climate and land use change in the Brazilian Atlantic Forest	2017	Diversity and Distributions	77	10.1111/ddi.12588
AR14	Valenzuela Nuñez L.M.; Martínez Sifuentes A.R.; Hernández Herrera J.A.; de la Peña C.G.; Briceño Contreras E.A.; Ríos Saucedo J.C.; Guerrero E.M.	Spatial exploration, dendrometric characteristics and prediction models of wood production in a stand of <i>Acacia schaffneri</i> in Durango, Mexico	2022	Folia Oecologica	0	10.2478/foecol-2022-0008
AR15	Adamek K.; Lupa M.; Zawadzki M.	Remote sensing techniques for tracking changes caused by illegal gold mining in Madre de Dios, Peru	2021	Miscellanea Geographica	3	10.2478/mgrsd-2020-0028

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR16	Meddens A.J.H.; Hicke J.A.; Jacobs B.F.	Characterizing the Response of Piñon-Juniper Woodlands to Mechanical Restoration Using High-Resolution Satellite Imagery	2016	Rangeland Ecology and Management International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	8	10.1016/j.rama.2015.12.006
AR17	Liesenberg V.	Characterizing Biophysical Attributes in Tropical Secondary Forest Environments with Multitemporal Hyperspectral Images	2022	Applied Geography	0	10.1109/IGARSS46834.2022.9884914
AR18	López S.	Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon	2022	Communications in Computer and Information Science	7	10.1016/j.apgeog.2022.102749
AR19	Barreto-Álvarez D.E.; Heredia-Rengifo M.G.; Padilla-Almeida O.; Toulkeridis T.	Multitemporal Evaluation of the Recent Land Use Change in Santa Cruz Island, Galapagos, Ecuador	2020	Forests	13	10.1007/978-3-030-62833-8_38
AR20	Klauber C.; Vidal E.; Silva C.A.; Hudak A.T.; Oliveira M.; Higuchi P. Borda-Niño M.; Ceccon E.; Meli P.; Hernández-Muciño D.; Mas J.-F.; Brancalion P.H.S.	Short-term effects of reduced-impact logging on <i>Copaifera</i> spp. (Fabaceae) regeneration in Eastern Amazon	2017	Perspectives in Ecology and Conservation	3	10.3390/f8070257
AR21	Hernández-Muciño D.; Mas J.-F.; Brancalion P.H.S.	Integrating farmers' decisions on the assessment of forest regeneration drivers in a rural landscape of Southeastern Brazil	2021	Forests	9	10.1016/j.peco.2021.04.001
AR22	Rubiano K.; Clerici N.; Norden N.; Etter A.	Secondary forest and shrubland dynamics in a highly transformed landscape in the Northern Andes of Colombia (1985-2015)	2017	Regional Environmental Change	34	10.3390/f8060216
AR23	Braun A.C.; Faßnacht F.; Valencia D.; Sepulveda M.	Consequences of land-use change and the wildfire disaster of 2017 for the central Chilean biodiversity hotspot	2021	Remote Sensing	6	10.1007/s10113-021-01756-4
AR24	Miranda A.; Catalán G.; Altamirano A.; Zamorano-Elgueta C.; Cavieres M.; Guerra J.; Mola-Yudego B.	How much can we see from a uav-mounted regular camera? Remote sensing-based estimation of forest attributes in south american native forests	2021	Madera y Bosques	4	10.3390/rs13112151
AR25	González Ovando M.L.; Plascencia Escalante F.O.; Martínez-Trinidad T.	Priority areas for ecological restoration and reference sites in chignahuapan-Zacatlán region; [Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la region chignahuapan-Zacatlán]	2016		6	10.21829/myb.2016.2221323

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR26	Mendes F.S.; Baron D.; Gerold G.; Liesenberg V.; Erasmi S.	Optical and SAR remote sensing synergism for mapping vegetation types in the endangered Cerrado/Amazon ecotone of Nova Mutum-Mato Grosso	2019	Remote Sensing	24	10.3390/rs11101161
AR27	Peck M.; Mariscal A.; Padbury M.; Cane T.; Kniveton D.; Chinchero M.A.	Identifying tropical Ecuadorian Andean trees from inter-crown pixel distributions in hyperspatial aerial imagery	2012	Applied Vegetation Science	9	10.1111/j.1654-109X.2012.01196.x
AR28	Bellis L.M.; Pidgeon A.M.; Alcántara C.; Dardanelli S.; Radeloff V.C.	Influences of succession and erosion on bird communities in a South American highland wooded landscape	2015	Forest Ecology and Management	11	10.1016/j.foreco.2015.03.047
AR29	Maurent E.; Hérault B.; Piponiot C.; Derroire G.; Delgado D.; Finegan B.; Kientz M.A.; Amani B.H.K.; Bieng M.A.N.	A common framework to model recovery in disturbed tropical forests: Common model for disturbed forest recovery	2023	Ecological Modelling	1	10.1016/j.ecoimodel.2023.110418
AR30	Fantini A.C.; Bauer E.; de Valois C.M.; Siddique I.	The demise of swidden-fallow agriculture in an Atlantic Rainforest region: Implications for farmers' livelihood and conservation	2017	Land Use Policy	17	10.1016/j.landusepol.2017.09.039
AR31	Coddington C.P.J.; Cooper W.J.; Mokross K.; Luther D.A.	Forest structure predicts species richness and functional diversity in Amazonian mixed-species bird flocks	2023	Biotropica	0	10.1111/btp.13201
AR32	Shestakova T.A.; Mackey B.; Hugh S.; Dean J.; Kukavskaya E.A.; Laflamme J.; Shvetsov E.G.; Rogers B.M.	Mapping Forest Stability within Major Biomes Using Canopy Indices Derived from MODIS Time Series	2022	Remote Sensing	2	10.3390/rs14153813
AR33	Locher-Krause K.E.; Volk M.; Waske B.; Thonfeld F.; Lautenbach S.	Expanding temporal resolution in landscape transformations: Insights from a landsat-based case study in Southern Chile	2017	Ecological Indicators	13	10.1016/j.ecoind.2016.12.036
AR34	Benami E.; Curran L.M.; Cochrane M.; Venturieri A.; Franco R.; Kneipp J.; Swartos A.	Oil palm land conversion in Pará, Brazil, from 2006-2014: Evaluating the 2010 Brazilian Sustainable Palm Oil Production Program	2018	Environmental Research Letters	44	10.1088/1749-3266/aa270
AR35	Clerici N.; Rubiano K.; Abd-Elrahman A.; Hoestettler J.M.P.; Escobedo F.J.	Estimating aboveground biomass and carbon stocks in periurban Andean secondary forests using very high resolution imagery	2016	Forests	38	10.3390/f7070138
AR36	Tejada G.; Gatti L.V.; Basso L.S.; Cassol H.L.G.; Silva-Junior C.H.L.; Mataveli G.; Marani L.; Arai E.;	CO2 emissions in the Amazon: are bottom-up estimates from land use and cover datasets consistent with top-down estimates based on atmospheric measurements?	2023	Frontiers in Forests and Global Change	0	10.3389/ffgc.2023.1107580

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR37	Gloor M.; Miller J.B.; Cunha C.L.; Domingues L.G.; Ipia A.; Correia C.S.C.; Crispim S.P.; Neves R.A.L.; Von Randow C. Algeet-Abarquero N.; Sánchez-Azofeifa A.; Bonatti J.; Marchamalo M.	Land cover dynamics in Osa Region, Costa Rica: secondary forest is here to stay	2015	Regional Environmental Change IEEE 1st International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, GRSS-CHILE 2017	12	10.1007/s10113-014-0714-9
AR38	Ugalde F.; Marangunic C.; Casassa G.	Ice thickness changes at Aparejo Glacier in central Chile from interferometric satellite data	2017	International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, GRSS-CHILE 2017	2	10.1109/GRSS-CHILE.2017.7996013
AR39	Cao S.; Sanchez-Azofeifa G.A.; Duran S.M.; Calvo-Rodriguez S.	Estimation of aboveground net primary productivity in secondary tropical dry forests using the Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model	2016	Environmental Research Letters	42	10.1088/1748-9326/11/7/075004
AR40	Albuquerque R.W.; Matsumoto M.H.; Calmon M.; Ferreira M.E.; Vieira D.L.M.; Grohmann C.H.	A protocol for canopy cover monitoring on forest restoration projects using low-cost drones	2022	Open Geosciences	2	10.1515/geo-2022-0406
AR41	Sylvester J.; Valencia J.; Verchot L.V.; Chirinda N.; Romero Sanchez M.A.; Quintero M.; Castro-Nunez A.	A rapid approach for informing the prioritization of degraded agricultural lands for ecological recovery: A case study for Colombia	2020	Journal for Nature Conservation	5	10.1016/j.jnc.2020.125921
AR42	Blinn C.E.; Browder J.O.; Pedlowski M.A.; Wynne R.H.	Rebuilding the Brazilian rainforest: Agroforestry strategies for secondary forest succession	2013	Applied Geography	9	10.1016/j.apgeog.2013.06.013
AR43	Gonzalez P.; Kroll B.; Vargas C.R.	Tropical rainforest biodiversity and aboveground carbon changes and uncertainties in the Selva Central, Peru	2014	Forest Ecology and Management Revista Internacional de	27	10.1016/j.foreco.2013.10.019
AR44	Montilla Pacheco A.D.J.; Pacheco Gil H.A.	Temporal and spatial behavior of the riparian forest in the lower reaches of the Portoviejo River and the Chilan ravine, province of Manabí, Ecuador; [Comportamiento temporal y espacial del	2017	Revista Internacional de	4	10.20937/RICA.2017.33.01.02

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR45	Caviglia-Harris J.L.; Toomey M.; Harris D.W.; Mullan K.; Bell A.R.; Sills E.O.; Roberts D.A.	bosque ribereño en el curso bajo del río portoviejo y la quebrada chilán, provincia de Manabí, Ecuador] Detecting and interpreting secondary forest on an old Amazonian frontier	2015	Contaminacion Ambiental Journal of Land Use Science	8	10.1080/1747423X.2014.940614
AR46	Guzmán-Hernández V.; Monte-Luna P.D.; López-Castro M.C.; Uribe-Martínez A.; Huerta-Rodríguez P.; Gallegos-Fernández S.A.; Azanza-Ricardo J.; Martínez-Portugal R.C.; Barragán-Zepeda A.K.; Pali G.P.Q.; Martín-Viaña Y.F.; Gómez-Ruíz P.A.; Acosta-Sánchez H.H.; López-Hernández M.; Castañeda-Ramírez D.G.; Ortíz A.; Cuevas E.	Recovery of green turtle populations and their interactions with coastal dune as a baseline for an integral ecological restoration; [Recuperación de poblaciones de tortuga verde y sus interacciones con la duna costera como línea base para una restauración ecológica integral]	2022	Acta Botanica Mexicana	4	10.21829/ABM129.2022.1954
AR47	Forzini E.; Castelli G.; Salbitano F.; Bresci E.	USING GOOGLE EARTH ENGINE FOR THE ANALYSIS OF FOG AND FOREST LANDSCAPE INTERACTIONS IN HYPER-ARID AREAS OF SOUTHERN PERU	2019	Trends in Earth Observation	0	
AR48	Schwartz N.B.; Uriarte M.; Defries R.; Gutierrez-Velez V.H.; Pinedo-Vasquez M.A.	Land-use dynamics influence estimates of carbon sequestration potential in tropical second-growth forest	2017	Environmental Research Letters	35	10.1088/1748-9326/aa708b
AR49	Valle I.C.; Francelino M.R.; Hardt E.; Pinheiro H.S.K.	Landscape Indicators of the Success of Protected Areas on Habitat Recovery for the Golden Lion Tamarin (<i>Leontopithecus rosalia</i>)	2018	Ecoscience	4	10.1080/11956860.2017.1414664
AR50	Gutiérrez Á.G.; Chávez R.O.; Díaz-Hormazábal I.	Canopy gap structure as an indicator of intact, old-growth temperate rainforests in the valdivian ecoregion	2021	Forests	2	10.3390/f12091183
AR51	Zutta B.R.; Salinas N.; Cosío E.G.; Tito R.; Aragón S.; Nina-Quispe A.; Roman-Cuesta R.M.	Satellite-derived forest canopy greenness shows differential drought vulnerability of secondary forests compared to primary forests in Peru	2023	Environmental Research Letters	1	10.1088/1748-9326/acc8ea
AR52	Prieto-Amparán J.A.; Villarreal-Guerrero F.; Martínez-Salvador M.; Manjarrez-Domínguez C.; Vázquez-Quintero G.; Pinedo-Alvarez A.	Spatial near future modeling of land use and land cover changes in the temperate forests of Mexico	2019	PeerJ	11	10.7717/peerj.6617

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR53	dos Santos J.F.C.; de Mendonça B.A.F.; de Araújo E.J.G.; Delgado R.C.; Gleriani J.M.	Potential areas for the formation of ecological corridors between remnants of atlantic forest; [Áreas potenciais à formação de corredores ecológicos entre remanescentes de mata atlântica]	2016	Revista Arvore	5	10.1590/0100-67622016000500004
AR54	de Mendonça G.C.; Costa R.C.A.; Parras R.; de Oliveira L.C.M.; Abdo M.T.V.N.; Pacheco F.A.L.; Pissarra T.C.T.	Spatial indicator of priority areas for the implementation of agroforestry systems: An optimization strategy for agricultural landscapes restoration	2022	Science of the Total Environment	11	10.1016/j.scitotenv.2022.156185
AR55	Rodríguez-Zúñiga M.T.; Troche-Souza C.; Cruz-López M.I.; Rivera-Monroy V.H.	Development and Structural Organization of Mexico's Mangrove Monitoring System (SMMM) as a Foundation for Conservation and Restoration Initiatives: A Hierarchical Approach	2022	Forests	4	10.3390/f13040621
AR56	Solórzano J.V.; Mas J.F.; Gallardo-Cruz J.A.; Gao Y.; Fernández-Montes de Oca A.	Deforestation detection using a spatio-temporal deep learning approach with synthetic aperture radar and multispectral images	2023	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	4	10.1016/j.isprsjprs.2023.03.017
AR57	Scheeres J.; de Jong J.; Brede B.; Brancalion P.H.S.; Broadbent E.N.; Zambrano A.M.A.; Gorgens E.B.; Silva C.A.; Valbuena R.; Molin P.; Stark S.; Rodrigues R.R.; Santoro G.B.; Resende A.F.; de Almeida C.T.; de Almeida D.R.A.	Distinguishing forest types in restored tropical landscapes with UAV-borne LIDAR	2023	Remote Sensing of Environment	2	10.1016/j.rse.2023.113533
AR58	de Almeida D.R.A.; Almeyda Zambrano A.M.; Broadbent E.N.; Wendt A.L.; Foster P.; Wilkinson B.E.; Salk C.; Papa D.D.A.; Stark S.C.; Valbuena R.; Gorgens E.B.; Silva C.A.; Brancalion P.H.S.; Fagan M.; Meli P.; Chazdon R.	Detecting successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar	2020	Biotropica	18	10.1111/btp.12814
AR59	Maillard O.	Post-Fire Natural Regeneration Trends in Bolivia: 2001–2021	2023	Fire	2	10.3390/fire6010018
AR60	Shanafield M.; Gutiérrez-Jurado H.; Rodríguez-Burgueño J.E.;	Short- and long-term evapotranspiration rates at ecological restoration sites along a large river receiving rare flow events	2017	Hydrological Processes	13	10.1002/hyp.11359

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
	Ramírez-Hernández J.; Jarchow C.J.; Nagler P.L.					
AR61	Tao Y.; Wang Q.	Quantitative recognition and characteristic analysis of production-living-ecological space evolution for five resource-based cities: Zululand, Xuzhou, Lota, Surf coast and Ruhr	2021	Remote Sensing	24	10.3390/rs13081563
AR62	Godinho Cassol H.L.; De Oliveira E Cruz De Aragão L.E.; Moraes E.C.; De Brito Carreiras J.M.; Shimabukuro Y.E.	Quad-pol Advanced Land Observing Satellite / Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar-2 (ALOS/PALSAR-2) data for modelling secondary forest above-ground biomass in the central Brazilian Amazon	2021	International Journal of Remote Sensing	5	10.1080/01431161.2021.1903615
AR63	Carreiras J.M.B.; Jones J.; Lucas R.M.; Shimabukuro Y.E.	Mapping major land cover types and retrieving the age of secondary forests in the Brazilian Amazon by combining single-date optical and radar remote sensing data	2017	Remote Sensing of Environment	44	10.1016/j.rse.2017.03.016
AR64	Bastille-Rousseau G.; Gibbs J.P.; Campbell K.; Yackulic C.B.; Blake S.	Ecosystem implications of conserving endemic versus eradicating introduced large herbivores in the Galapagos Archipelago	2017	Biological Conservation	10	10.1016/j.biocon.2017.02.015
AR65	Corona-Núñez R.O.; Campo J.; Williams M.	Aboveground carbon storage in tropical dry forest plots in Oaxaca, Mexico	2018	Forest Ecology and Management	23	10.1016/j.for-eco.2017.11.014
AR66	Gutiérrez-Velez V.H.; Uriarte M.; Defries R.; Pinedo-Vasquez M.; Fernandes K.; Ceccato P.; Baethgen W.; Padoch C.	Land cover change interacts with drought severity to change fire regimes in Western Amazonia	2014	Ecological Applications	32	10.1890/13-2101.1
AR67	Piazza G.A.; Vibrans A.C.; Liesenberg V.; Refosco J.C.	Object-oriented and pixel-based classification approaches to classify tropical successional stages using airborne high-spatial resolution images	2016	GIScience and Remote Sensing	31	10.1080/15481603.2015.1130589
AR68	de los Santos-Reyes E.; del Castillo R.F.; Rös M.; Bray D.B.	Contrasting patterns of land-cover change between early and late successional forests in a tropical montane cloud forest area managed under the milpa system	2023	Forest Ecology and Management	0	10.1016/j.for-eco.2023.121469
AR69	Carreiras J.M.B.; Jones J.; Lucas R.M.; Gabriel C.	Land use and land cover change dynamics across the Brazilian Amazon: Insights from extensive time-series analysis of remote sensing data	2014	PLoS ONE	50	10.1371/journal.pone.0104144
AR70	Duan M.; Bax C.; Laakso K.; Mashhadi N.; Mattie N.; Sanchez-Azofeifa A.	Characterizing Transitions between Successional Stages in a Tropical Dry Forest Using LiDAR Techniques	2023	Remote Sensing	1	10.3390/rs15020479

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR71	Withey K.; Berenguer E.; Palmeira A.F.; Espírito-Santo F.D.B.; Lennox G.D.; Silva C.V.J.; Aragão L.E.O.C.; Ferreira J.; França F.; Malhi Y.; Rossi L.C.; Barlow J.	Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests	2018	Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences	57	10.1098/rstb.2017.0312
AR72	Cao S.; Yu Q.; Sanchez-Azofeifa A.; Feng J.; Rivard B.; Gu Z.	Mapping tropical dry forest succession using multiple criteria spectral mixture analysis	2015	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	29	10.1016/j.isprsjprs.2015.08.009
AR73	Moura V.; de Souza R.A.; Mercante E.; Richetti J.; Johann J.A. Cabral R.P.; da Silva G.F.; de Almeida A.Q.; Bonilla-Bedoya S.; Dias H.M.; De Mendonça A.R.; Rodrigues N.M.M.; Valente C.C.A.; Oliveira K.; Gonçalves F.G.; Sarcinelli T.S.	Three decades after: Landscape dynamics in different colonisation models implemented in the Brazilian legal Amazon	2021	Remote Sensing	1	10.3390/rs13224581
AR74	Dias H.M.; De Mendonça A.R.; Rodrigues N.M.M.; Valente C.C.A.; Oliveira K.; Gonçalves F.G.; Sarcinelli T.S.	Mapping of the Successional Stage of a Secondary Forest Using Point Clouds Derived from UAV Photogrammetry	2023	Remote Sensing	0	10.3390/rs15020509
AR75	Godinho Cassol H.L.; De Aragao L.E.O.C.; Moraes E.C.; Manuel De Brito Carreiras J.; Shimabukuro Y.E.	Polarimetric Alos/Palsar-2 Data for Retrieving Aboveground Biomass of Secondary Forest in the Brazilian Amazon	2019	International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) Recent	0	10.1109/IGA RSS.2019.8898251
AR76	Balestrin D.; Martins S.V.; de Andrade C.F.	Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil	2019	Advances in Ecological Restoration	1	
AR77	Meyer V.; Saatchi S.; Ferraz A.; Xu L.; Duque A.; García M.; Chave J.	Forest degradation and biomass loss along the Chocó region of Colombia	2019	Carbon Balance and Management	25	10.1186/s13021-019-0117-9
AR78	Bispo P.D.C.; Pardini M.; Papathanassiou K.P.; Kugler F.; Balzter H.; Rains D.; dos Santos	Mapping forest successional stages in the Brazilian Amazon using forest heights derived from TanDEM-X SAR interferometry	2019	Remote Sensing of Environment	25	10.1016/j.rse.2019.05.013

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR79	J.R.; Rizaev I.G.; Tansey K.; dos Santos M.N.; Spinelli Araujo L. Fagan M.E.; DeFries R.S.; Sesnie S.E.; Arroyo-Mora J.P.; Soto C.; Singh A.; Townsend P.A.; Chazdon R.L.	Mapping species composition of forests and tree plantations in northeastern Costa Rica with an integration of hyperspectral and multitemporal landsat imagery	2015	Remote Sensing	53	10.3390/rs70505660
AR80	Osorio R.J.; Linhoss A.; Dash P.	Evaluation of marsh terraces for wetland restoration: A remote sensing approach	2020	Water (Switzerland)	7	10.3390/w12020336
AR81	Villarreal M.L.; Haire S.L.; Iniguez J.M.; Cortés Montaña C.; Poitras T.B.	Distant neighbors: recent wildfire patterns of the Madrean Sky Islands of southwestern United States and northwestern Mexico	2019	Fire Ecology	15	10.1186/s42408-018-0012-x
AR82	Vieira C.A.O.; Teixeira A.B.; Do Prado T.C.S.; Fontana F.F.; Vitto R.	Assessing on estimates of biomass in forest areas	2014	Accuracy 2014 - Proceedings of the 11th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives Forest Ecology and Management	0	
AR83	Gebhardt S.; Maeda P.; Wehrmann T.; Espinoza J.A.; Schmidt M.	A proper land cover and forest type classification scheme for Mexico	2015	Accuracy 2014 - Proceedings of the 11th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives Forest Ecology and Management	11	10.5194/isprs-archives-XL-7-W3-383-2015
AR84	Marsh C.; Crockett J.L.; Krofcheck D.; Keyser A.; Allen C.D.; Litvak M.; Hurteau M.D.	Planted seedling survival in a post-wildfire landscape: From experimental planting to predictive probabilistic surfaces	2022	Forest Ecology and Management	8	10.1016/j.for-eco.2022.120524

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR85	Ferrer Velasco R.; Lippe M.; Tamayo F.; Mfuni T.; Sales-Come R.; Mangabat C.; Schneider T.; Günter S.	Towards accurate mapping of forest in tropical landscapes: A comparison of datasets on how forest transition matters	2022	Remote Sensing of Environment	7	10.1016/j.rse.2022.112997
AR86	Fuentes-Castillo T.; Miranda A.; Rivera-Hutinel A.; Smith-Ramírez C.; Holmgren M.	Nucleated regeneration of semiarid sclerophyllous forests close to remnant vegetation	2012	Forest Ecology and Management	24	10.1016/j.for-eco.2012.02.019
AR87	Morocho R.; González I.; Ferreira T.O.; Otero X.L.	Mangrove Forests in Ecuador: A Two-Decade Analysis	2022	Forests	5	10.3390/f13050656
AR88	Méndez-Alonzo R.; Olson M.E.; Paz H.; Reyes-García C.; Espadas-Manrique C.; Tinoco-Ojanguren C.; Trueba S.	STUDIES OF PLANT HYDRAULICS AND WATER RELATIONS IN MEXICAN ENVIRONMENTS: ADAPTATION, PHYSIOLOGY, AND APPLICATIONS; [ESTUDIOS SOBRE HIDRÁULICA Y RELACIONES HÍDRICAS DE PLANTAS EN AMBIENTES MEXICANOS: ADAPTACIONES, FISIOLÓGÍA Y APLICACIONES]	2022	Botanical Sciences	0	10.17129/bot-sci.3162
AR89	Wilson S.J.; Coomes O.T.; Dallaire C.O.	The 'ecosystem service scarcity path' to forest recovery: a local forest transition in the Ecuadorian Andes	2019	Regional Environmental Change	11	10.1007/s10113-019-01544-1
AR90	Basualdo M.; Huykman N.; Volante J.N.; Paruelo J.M.; Piñeiro G.	Lost forever? Ecosystem functional changes occurring after agricultural abandonment and forest recovery in the semiarid Chaco forests	2019	Science of the Total Environment	26	10.1016/j.scitotenv.2018.09.001
AR91	Coomes O.T.; Cheng Y.; Takasaki Y.; Abizaid C.	What drives clearing of old-growth forest over secondary forests in tropical shifting cultivation systems? Evidence from the Peruvian Amazon	2021	Ecological Economics	7	10.1016/j.ecolecon.2021.107170
AR92	Haneda L.E.; Brancalion P.H.S.; Molin P.G.; Ferreira M.P.; Silva C.A.; de Almeida C.T.; Resende A.F.; Santoro G.B.; Rosa M.; Guillemot J.; Le Maire G.; Feret J.-B.; de Almeida D.R.A.	Forest landscape restoration: Spectral behavior and diversity of tropical tree cover classes	2023	Remote Sensing Applications: Society and Environment	1	10.1016/j.rsa-se.2022.100882
AR93	Pena M.A.; Bravol A.; Fernandez E.	Assessing the damage of forests burnt in central Chile by relating index-derived differences to field data	2020	2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference,	1	10.1109/LAGI-RS48042.2020.9165622

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR94	Pacheco-Pascagaza A.M.; Garcia M.; Rodríguez-Veiga P.; Balzter H.	The use of multifrequency sar data for assessing levels of forest disturbance in Bajo Calima Colombia	2018	LAGIRS 2020 - Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	1	10.1109/IGARSS.2018.8518871
AR95	Ghosh S.; Mishra D.R.; Gitelson A.A.	Long-term monitoring of biophysical characteristics of tidal wetlands in the northern Gulf of Mexico - A methodological approach using MODIS	2016	Remote Sensing of Environment	67	10.1016/j.rse.2015.11.015
AR96	Almeida D.R.A.D.; Broadbent E.N.; Ferreira M.P.; Meli P.; Zambrano A.M.A.; Gorgens E.B.; Resende A.F.; de Almeida C.T.; do Amaral C.H.; Corte A.P.D.; Silva C.A.; Romanelli J.P.; Prata G.A.; de Almeida Papa D.; Stark S.C.; Valbuena R.; Nelson B.W.; Guillemot J.; Féret J.-B.; Chazdon R.; Brancalion P.H.S.	Monitoring restored tropical forest diversity and structure through UAV-borne hyperspectral and lidar fusion	2021	Remote Sensing of Environment	48	10.1016/j.rse.2021.112582
AR97	Ibarra-Bonilla J.S.; Villarreal-Guerrero F.; Prieto-Amparán J.A.; Santellano-Estrada E.; Pinedo-Alvarez A.	Characterizing the impact of Land-Use/Land-Cover changes on a Temperate Forest using the Markov model	2021	Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science	8	10.1016/j.ejrs.2021.11.004
AR98	Quan Y.; Hutjes R.W.A.; Biemans H.; Zhang F.; Chen X.; Chen X.	Patterns and drivers of carbon stock change in ecological restoration regions: A case study of upper Yangtze River Basin, China	2023	Journal of Environmental Management	0	10.1016/j.jenvman.2023.119376
AR99	Almeida D.R.A.; Stark S.C.; Chazdon R.; Nelson B.W.; Cesar R.G.; Meli P.; Gorgens E.B.; Duarte M.M.; Valbuena R.; Moreno V.S.; Mendes A.F.; Amazonas N.	The effectiveness of lidar remote sensing for monitoring forest cover attributes and landscape restoration	2019	Forest Ecology and Management	67	10.1016/j.for eco.2019.02.002

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR100	Gonçalves N.B.; Silva C.A.; Schietti J.; Brancalion P.H.S. López-Martínez J.O.; Sanaphre-Villanueva L.; Macario-Mendoza P.A.; Escobar-López A.; Aragón-Moreno A.A.; Islebe G.A.; Vargas-Larreta B.	Identifying alternative stable states in a tropical landscape using remote sensing	2023	Plant Ecology	0	10.1007/s11258-023-01323-3
AR101	Arce-Nazario J.A.	River and human legacies in Amazonian floodplain postagricultural forests	2011	The Amazon Várzea: The Decade Past and the Decade Ahead	0	10.1007/978-94-007-0146-5_13
AR102	Arroyo-Mora J.P.; Sánchez-Azofeifa G.A.; Kalacska M.E.R.; Rivard B.; Calvo-Alvarado J.C.; Janzen D.H.	Secondary forest detection in a neotropical dry forest landscape using Landsat 7 ETM+ and IKONOS imagery	2005	Biotropica	85	10.1111/j.1744-7429.2005.00068.x
AR103	Walsh S.J.; McCleary A.L.; Mena C.F.; Shao Y.; Tuttle J.P.; González A.; Atkinson R.	QuickBird and Hyperion data analysis of an invasive plant species in the Galapagos Islands of Ecuador: Implications for control and land use management	2008	Remote Sensing of Environment	123	10.1016/j.rse.2007.06.028
AR104	Walsh S.J.; Shao Y.; Mena C.F.; McCleary A.L.	Integration of hyperion satellite data and a household social survey to characterize the causes and consequences of reforestation patterns in the northern Ecuadorian Amazon	2008	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing IEEE	23	10.14358/PE-IEEE.74.6.725
AR105	Hoekman D.H.; Quinones M.J.	Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon	2000	Transactions on Geoscience and Remote Sensing	123	10.1109/36.841998
AR106	Dalle S.P.; De Blois S.; Caballero J.; Johns T.	Integrating analyses of local land-use regulations, cultural perceptions and land-use/land cover data for assessing the success of community-based conservation	2006	Forest Ecology and Management	59	10.1016/j.foreco.2005.10.052
AR107	Vieira I.C.G.; De Almeida A.S.; Davidson E.A.; Stone T.A.; Reis De Carvalho C.J.; Guerrero J.B.	Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia	2003	Remote Sensing of Environment	178	10.1016/j.rse.2002.09.002

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR108	Forrest J.L.; Sanderson E.W.; Wallace R.; Lazzo T.M.S.; Cerveró L.H.G.; Coppolillo P.	Patterns of land cover change in and around Madidi National Park, Bolivia	2008	Biotropica	27	10.1111/j.1744-7429.2007.00382.x
AR109	Clark D.B.; Read J.M.; Clark M.L.; Cruz A.M.; Dotti M.F.; Clark D.A.	Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests	2004	Ecological Applications International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	89	10.1890/02-5120
AR110	Dutra L.V.; Elmiro M.T.; Soares Filho B.S.; Mura J.C.; Santos J.R.; Freitas C.C.; Araujo L.S.; De Albuquerque P.C.G.; Vieira P.R.; Gama F.F.	Assessment of digital elevation models obtained in Brazilian Amazon based on P and X band airborne interferometric data	2002	Ecological Applications International Journal of Remote Sensing	7	10.1080/01431160110093000
AR111	Dalle S.P.; Pulido M.T.; De Blois S.	Balancing shifting cultivation and forest conservation: Lessons from a "sustainable landscape" in southeastern Mexico	2011	Ecology and Society	29	10.1890/10-0700.1
AR112	Podest E.; Saatchi S.	Application of multiscale texture in classifying JERS-1 radar data over tropical vegetation	2002	Biological Conservation	64	10.1016/j.biocon.2009.03.018
AR113	Grau H.R.; Hernández M.E.; Gutierrez J.; Gasparri N.I.; Casavecchia M.C.; Flores-Ivaldi E.E.; Paolini L.	A peri-urban neotropical forest transition and its consequences for environmental services	2008	Global Change Biology	70	10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x
AR114	Parry L.; Barlow J.; Peres C.A.	Allocation of hunting effort by Amazonian smallholders: Implications for conserving wildlife in mixed-use landscapes	2009	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	61	10.1109/TGRS.2011.2182516
AR115	Saatchi S.; Houghton R.A.; Dos Santos Alvalá R.C.; Soares J.V.; Yu Y.	Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin	2007		512	
AR116	Frolking S.; Hagen S.; Milliman T.; Palace M.; Shimbo J.Z.; Fahnestock M.	Detection of large-scale forest canopy change in pan-tropical humid forests 2000-2009 with the seawinds Ku-band scatterometer	2012		20	

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR117	Roberts D.A.; Keller M.; Soares J.V.	Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia	2003	Remote Sensing of Environment	72	10.1016/j.rse.2003.08.012
AR118	Rudel T.K.; Bates D.; Machinguiashi R.	A tropical forest transition? agricultural change, out-migration, and secondary forests in the ecuadorian amazon	2002	Annals of the Association of American Geographers	269	10.1111/1467-8306.00281
AR119	Powell R.L.; Matzke N.; De Souza Jr. C.; Clark M.; Numata I.; Hess L.L.; Roberts D.A.; Clark M.; Numata I.; Hess L.L.; Roberts D.A.	Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon	2004	Remote Sensing of Environment	148	10.1016/j.rse.2003.12.007
AR120	Salas W.A.; Ducey M.J.; Rignot E.; Skole D.	Assessment of JERS-1 SAR for monitoring secondary vegetation in Amazonia: I. Spatial and temporal variability in backscatter across a chrono-sequence of secondary vegetation stands in Rondonia	2002	International Journal of Remote Sensing	33	10.1080/01431160110092939
AR121	Quesada M.; Sanchez-Azofeifa G.A.; Alvarez-Añorve M.; Stoner K.E.; Avila-Cabadilla L.; Calvo-Alvarado J.; Castillo A.; Espírito-Santo M.M.; Fagundes M.; Fernandes G.W.; Gamon J.; Lopezaraiza-Mikel M.; Lawrence D.; Morellato L.P.C.; Powers J.S.; Neves F.d.S.; Rosas-Guerrero V.; Sayago R.; Sanchez-Montoya G.	Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives	2009	Forest Ecology and Management	259	10.1016/j.for-eco.2009.06.023
AR122	Garcia-Millan V.E.; Sanchez-Azofeifa G.A.	Mapping tropical dry forest succession with chris - Proba hyperspectral images using non-parametric decisional trees	2011	34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational	0	

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR123	Neeff T.; De Alencastro Graça P.M.; Dutra L.V.; Da Costa Freitas C.	Carbon budget estimation in Central Amazonia: Successional forest modeling from remote sensing data	2005	Environmental Monitoring Remote Sensing of Environment	22	10.1016/j.rse.2004.12.002
AR124	Aragão L.E.O.C.; Shimabukuro Y.E.; Espírito Santo F.D.B.; Williams M.	Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia	2005	Forest Ecology and Management	52	10.1016/j.for-eco.2005.02.062
AR125	Simard M.; Rivera-Monroy V.H.; Mancera-Pineda J.E.; Castañeda-Moya E.; Twilley R.R.	A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia	2008	Remote Sensing of Environment	136	10.1016/j.rse.2007.10.012
AR126	Pearman P.B.	The scale of community structure: Habitat variation and avian guilds in tropical forest understory	2002	Ecological Monographs	135	10.1890/0012-9615(2002)072[0019:TSOC SH]2.0.CO;2
AR127	Neeff T.; Lucas R.M.; Santos J.R.D.; Brondizio E.S.; Freitas C.C.	Area and age of secondary forests in Brazilian Amazonia 1978-2002: An empirical estimate	2006	Ecosystems	75	10.1007/s10021-006-0001-9
AR128	Couturier S.; Gastellu-Etchegorry J.-P.; Patiño P.; Martin E.	A model-based performance test for forest classifiers on remote-sensing imagery	2009	Forest Ecology and Management	15	10.1016/j.for-eco.2008.08.017
AR129	Metzger J.P.	Effects of slash-and-burn fallow periods on landscape structure	2003	Environmental Conservation	39	10.1017/S0376892903000341
AR130	Arroyo-Mora J.P.; Sánchez-Azofeifa G.A.; Rivard B.; Calvo J.C.; Janzen D.H.	Dynamics in landscape structure and composition for the Chorotega region, Costa Rica from 1960 to 2000	2005	Agriculture, Ecosystems and Environment	104	10.1016/j.agee.2004.07.002
AR131	Neeff T.	Deforestation, biomass and carbon finance in Amazonia	2008	Climate Policy	3	10.3763/cpol.2007.0355
AR132	De Oliveira Andrade N.S.; Araujo L.S.; Numata I.; Filho M.V.	Study of the vegetal covering and land use dynamics in the region of Ji-Paraná/Ro using classification technics	2000	International Archives of the Photogrammetry, Remote	0	

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR133	Castro K.L.; Sanchez-Azofeifa G.A.; Rivard B.	Monitoring secondary tropical forests using space-borne data: Implications for Central America	2003	Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives International Journal of Remote Sensing	94	10.1080/01431160210154056
AR134	Wessels K.J.; De Fries R.S.; Dempewolf J.; Anderson L.O.; Hansen A.J.; Powell S.L.; Moran E.F.	Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil	2004	Remote Sensing of Environment	105	10.1016/j.rse.2004.05.002
AR135	Jayakumar S.; Ramachandran A.; Bhaskaran G.; Heo J.	Forest dynamics in the Eastern Ghats of Tamil Nadu, India	2009	Environmental Management	24	10.1007/s00267-008-9219-y
AR136	Rodríguez J.P.; Nassar J.M.; Rodríguez-Clark K.M.; Zager I.; Portillo-Quintero C.A.; Carrasquel F.; Zambrano S.	Tropical dry forests in Venezuela: Assessing status, threats and future prospects	2008	Environmental Conservation	13	10.1017/S0376892908005237
AR137	Li H.; Mausel P.; Brondizio E.; Deardorff D.	A framework for creating and validating a non-linear spectrum-biomass model to estimate the secondary succession biomass in moist tropical forests	2010	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	17	10.1016/j.isprsjprs.2010.01.002
AR138	Dos Santos J.R.; Neeff T.; Dutra L.V.; Gama F.F.; Mura J.C.; Freitas C.C.	SAR interferometric approaches for the analysis of structural forest parameters: State of the art and perspectives for Brazilian studies	2006	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	2	10.1109/IGARSS.2006.569
AR139	Hestir E.L.; Khanna S.; Andrew M.E.; Santos M.J.; Viers J.H.; Greenberg J.A.; Rajapakse S.S.; Ustin S.L.	Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem	2008	Remote Sensing of Environment	289	10.1016/j.rse.2008.01.022

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR140	Steininger M.K.	Net carbon fluxes from forest clearance and regrowth in the Amazon	2004	Ecological Applications	13	10.1890/02-6007
AR141	Hughes R.F.; Kauffman J.B.; Cummings D.L.	Fire in the Brazilian Amazon: 3. Dynamics of biomass, C, and nutrient pools in regenerating forests	2000	Oecologia	58	10.1007/s004420000416
AR142	Castillo M.; Rivard B.; Sánchez-Azofeifa A.; Calvo-Alvarado J.; Dubayah R.	LIDAR remote sensing for secondary Tropical Dry Forest identification	2012	Remote Sensing of Environment	38	10.1016/j.rse.2012.01.012
AR143	Perz S.G.; Skole D.L.	Secondary forest expansion in the Brazilian Amazon and the refinement of forest transition theory	2003	Society and Natural Resources	141	10.1080/08941920390178856
AR144	Garrido-Perez E.I.; Gerold G.	Land-use history and the origins and effects of lianas on tree-communities. The case of secondary forests in Northeastern Yucatan Peninsula, Mexico	2009	Erdkunde	3	10.3112/erdkunde.2009.03.01
AR145	Geissen V.; Sánchez-Hernández R.; Kampichler C.; Ramos-Reyes R.; Sepulveda-Lozada A.; Ochoa-Goana S.; de Jong B.H.J.; Huerta-Lwanga E.; Hernández-Daumas S.	Effects of land-use change on some properties of tropical soils - An example from Southeast Mexico	2009	Geoderma	79	10.1016/j.geoderma.2009.03.011
AR146	Mayaux P.; Holmgren P.; Achard F.; Eva H.; Stibig H.-J.; Branthomme A.	Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring	2005	Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences	308	10.1098/rstb.2004.1590
AR147	Alvarez N.L.; Naughton-Treves L.	Linking national agrarian policy to deforestation in the Peruvian Amazon: A case study of Tambopata, 1986-1997	2003	Ambio	62	10.1579/0044-7447-32.4.269
AR148	Broadbent E.N.; Zambrano A.M.A.; Dirzo R.; Durham W.H.; Driscoll L.; Gallagher P.; Salters R.; Schultz J.; Colmenares A.; Randolph S.G.	The effect of land use change and ecotourism on biodiversity: A case study of Manuel Antonio, Costa Rica, from 1985 to 2008	2012	Landscape Ecology	51	10.1007/s10980-012-9722-7
AR149	Anaya J.A.; Chuvieco E.; Palacios-Orueta A.	Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach	2009	Forest Ecology and Management	165	10.1016/j.for-eco.2008.11.016

Code	Authors	Title	Year	Source title	Cited by	DOI
AR150	Sitters J.; Holmgren M.; Stoorvogel J.J.; López B.C.	Rainfall-tuned management facilitates dry forest recovery	2012	Restoration Ecology	34	10.1111/j.1526-100X.2010.00761.x
AR151	Pejchar L.; Pringle R.M.; Ranganathan J.; Zook J.R.; Duran G.; Oviedo F.; Daily G.C.	Birds as agents of seed dispersal in a human-dominated landscape in southern Costa Rica	2008	Biological Conservation	62	10.1016/j.biocon.2007.11.008
AR152	Wodzynski R.; Schmidlin D.; Prestes M.	Technics of remote sensing and Geographic Information System applied in Climate Action Project in East Coast of Parana state	2004	International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	0	
AR153	Dubayah R.O.; Sheldon S.L.; Clark D.B.; Hofton M.A.; Blair J.B.; Hurtt G.C.; Chazdon R.L.	Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at la Selva, Costa Rica	2010	Journal of Applied Remote Sensing	251	10.1029/2009JG000933
AR154	Helmer E.H.; Lefsky M.A.; Roberts D.A.	Biomass accumulation rates of Amazonian secondary forest and biomass of old-growth forests from Landsat time series and the Geoscience Laser Altimeter System	2009	Journal of Applied Remote Sensing	73	10.1117/1.3082116
AR155	Browder J.O.; Wynne R.H.; Pedlowski M.A.	Agroforestry diffusion and secondary forest regeneration in the Brazilian Amazon: Further findings from the Rondônia Agroforestry Pilot Project (1992-2002)	2005	Agroforestry Systems	20	10.1007/s10457-004-6375-9

Anexo 5. Tablas de análisis bibliométrico

Tabla 10. Referencias más citadas de las publicaciones científicas y sus clústeres

Número de Citaciones	Referencias	Clúster ID
7	Myers N, 2000, Biodiversity Hotspots For Conservation Priorities @ Nature, V403, P853-858	0
6	Skole D, 1993, Tropical Deforestation And Habitat Fragmentation In The Amazon: Satellite Data From 1978 To 1988 @ Science, V0, P0	3
6	Hansen MC, 2013, High-Resolution Global Maps Of 21st-Century Forest Cover Change @ Science, V342, P850-853	0
5	Achard F, 2002, Determination Of Deforestation Rates Of The Worlds Humid Tropical Forests @ Science, V297, P999-1002	0
4	Laurance WF, 1997, Biomass Collapse In Amazonian Forest Fragments @ Science, V278, P1117-1118	1
4	Steininger MK, 1996, Tropical Secondary Forest Regrowth In The Amazon: Age @ Area And Change Estimation With Thematic Mapper Data, V0, P0	1
4	Aide TM, 2013, Deforestation And Reforestation Of Latin America And The Caribbean (2001-2010) @ Biotropica, V45, P262-271	5
3	Baker TR, 2004, Variation In Wood Density Determines Spatial Patterns In Amazonian Forest Biomass @ Global Change Biology, V10, P545-562	4
3	Aragao LEOC, 2010, The Incidence Of Fire In Amazonian Forests With Implications For Redd @ Science, V0, P0	2
3	Almeida DRA, 2019, The Effectiveness Of Lidar Remote Sensing For Monitoring Forest Cover Attributes And Landscape Restoration @ For. Ecol. Manag., V438, P34-43	8

Tabla 11. Análisis de citaciones por revista (journal)

#	Número de citaciones	Referencias	Clúster ID
1	77	Science, 2000	1
2	50	Biotropica, 2002	1
3	49	Nature, 2000	1
4	38	Ecology, 2000	3
5	35	Remote Sensing of Environment, 2002	2
6	31	Forest Ecology and Management, 2003	2
7	30	Bioscience, 2003	2
8	24	International Journal of Remote Sensing, 2002	2
9	21	Plos One, 2017	0

Tabla 12. Ocurrencias por frecuencia de palabras claves

ID	Etiqueta	Clúster	Ocurrencias	Enlaces	Promedio (Año publicación)
1247	Remote sensing	4	126	108	2014
589	Forestry	4	54	102	2013
1339	Secondary forest	1	45	98	2012
804	Land use	1	41	98	2013
357	Deforestation	1	37	85	2013

Anexo 6. Certificado de traducción del resumen (abstract)

Loja, 10 de diciembre del 2024

Yo, Xilena Elizabeth Aldeán Sandoval, con cédula de identidad 1104226913, como traductora certificada por el Ministerio de trabajo del Ecuador con licencia número MDT-3104-CCL-252643, certifico que la traducción del resumen de tesis denominado "**PROPUESTA DE INDICADORES ECOLÓGICOS A NIVEL ESPACIAL PARA EL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN DE PAISAJES EN EL NORTE DEL CANTÓN LOJA,**" es precisa en mis capacidades como traductora certificada.

El trabajo en mención es de autoría de los estudiantes **Carlos Andrés Burneo Rodríguez**, con cédula de identidad Nro. **1104446149** y **Fernando Israel Torres Jiménez**, con cédula de identidad Nro. **1103393417**.

I, Xilena Aldeán Sandoval, certify that I am fluent in the English and Spanish language and that the abstract of the thesis belonging to Carlos Andrés Burneo Rodríguez and Fernando Israel Torres Jiménez, is an accurate translation of its original Spanish version.



Xilena Elizabeth Aldeán Sandoval, Mg.

Traductora/Translator

Traductor/Translator: Xilena Elizabeth Aldeán Sandoval
Número de licencia/Acreditación number: MDT-3104-CCL-252643
Correo electrónico/E-mail: xaldeans@gmail.com
Teléfono/Phone number: +593 989491170