Revista Agro.

ISSN 2215-6992

Vol. 4, N°1.Pág 1-48, Enero – Diciembre, 2026

L. Carrillo Cabrera, J. Montoya Monserrate, S. Olvera Resabala, K. Alvarado Vásquez

Incidencia de la antropización sobre la productividad de la vegetación en el ecosistema que alberga los Manantiales de Smart Alliance

Incidencia de la antropización sobre la productividad de la vegetación en el ecosistema que alberga los Manantiales de Smart Alliance

Impact of anthropization on vegetation productivity in the ecosystem hosting the Smart Alliance Springs.

Incidência da antropização sobre a produtividade da vegetação no ecossistema que abriga as nascentes de Smart Alliance

Luis Emilio Carrillo Cabrera

Facultad de Posgrado gestión Ambiental

Master en Gestión Ambiental, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador

ROR: https://ror.org/05qrwjj27

CONTACTO: luis.carrillo2016@uteq.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0197-3771

creative commons

BY NC SA

Jelitza Narcisa Montoya Monserrate

Facultad de Posgrado gestión Ambienta

Master en Gestión Ambiental, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador

ROR: https://ror.org/05qrwjj27

CONTACTO: jelitza.montoya2017@uteq.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3668-5253

Steven Ivan Olvera Resabala

Facultad de Posgrado gestión Ambiental

Master en Gestión Ambiental, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador

ROR: https://ror.org/05qrwjj27

CONTACTO: solverar@uteq.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7674-6286

Revista Agro.

ISSN 2215-6992

Vol. 4, N°1.Pág 1-48, Enero – Diciembre, 2026

L. Carrillo Cabrera, J. Montoya Monserrate, S. Olvera Resabala, K. Alvarado Vásquez

Incidencia de la antropización sobre la productividad de la vegetación en el ecosistema que alberga los Manantiales de Smart Alliance

Kerly Estefanía Alvarado Vásquez

Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria

Master en Agroindustria, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

ROR: https://ror.org/05sn8wf81

CONTACTO: kalvarado6940@utm.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0494-7085

Recibido 02-09-2026 Revisado 07-10-2026 Aceptado 25-11-2026

Resumen

Este estudio analiza la incidencia de la antropización en la productividad de la vegetación del ecosistema de los manantiales de la empresa Smart Alliance, ubicado en La Maná, durante 2024. Se empleó el análisis de ortofotos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica para identificar y caracterizar las principales actividades antropogénicas. Además, se calcularon los índices espectrales de vegetación NDVI y EVI mediante imágenes satelitales MODIS Terra, con el fin de evaluar los cambios en la cobertura vegetal y su relación con las actividades humanas. Los resultados evidenciaron la presencia de agricultura, minería, urbanización, infraestructura vial y áreas de conservación boscosa. El análisis temporal mostró una tendencia decreciente en los índices de vegetación, reflejando una reducción progresiva de la cobertura vegetal. La vegetación disminuyó de 1,143 km² en 2019 a 1,01 km² en 2024. Por otra parte, la minería

aumentó de 3,4 km² a 11,04 km², la urbanización de 1,08 km² a 2,07 km² y las vías de 1,33 km² a 1,58 km². En conclusión, el incremento de las actividades antropogénicas afecta negativamente la productividad, densidad y capacidad fotosintética de la vegetación, generando consecuencias desfavorables para el ecosistema estudiado.

Palabras clave: actividades antropogénicas, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Índice mejorado de vegetación, cobertura vegetal, teledetección

Abstract: This study analyzes the impact of anthropogenic activities on vegetation productivity in the spring ecosystem of the Smart Alliance company, located in La Maná, during 2024. Orthophoto analysis and Geographic Information System tools were used to identify and characterize the main human activities in the area. In addition, the NDVI and EVI vegetation indices were calculated using MODIS Terra satellite images to assess changes in vegetation cover and their relationship with human activities. The results revealed the presence of agriculture, mining, urbanization, road infrastructure, and forest conservation areas. The temporal analysis showed a decreasing trend in vegetation indices, reflecting a progressive reduction in vegetation cover. Vegetation decreased from 1.143 km² in 2019 to 1.01 km² in 2024. Meanwhile, mining increased from 3.4 km² to 11.04 km², urbanization increased from 1.08 km² to 2.07 km², and roads expanded from 1.33 km² to 1.58 km². In conclusion, the increase in human activities negatively affects vegetation productivity, density, and

photosynthetic capacity, resulting in unfavorable consequences for the studied ecosystem.

Keywords: anthropogenic activities, Normalized Difference Vegetation Index, Enhanced Vegetation Index, vegetation cover, remote sensing

Resumo

Este estudo analisa a incidência da antropização sobre a produtividade da vegetação no ecossistema das nascentes da empresa Smart Alliance, localizado em La Maná, durante o ano de 2024. Foram utilizadas análises de ortofotos e ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica para identificar e caracterizar as principais atividades antropogênicas. Além disso, foram calculados os índices espectrais de vegetação NDVI e EVI por meio de imagens de satélite MODIS Terra, com o objetivo de avaliar as mudanças na cobertura vegetal e sua relação com as atividades humanas. Os resultados evidenciaram a presença de agricultura, mineração, urbanização, infraestrutura viária e áreas de conservação florestal. A análise temporal demonstrou uma tendência decrescente nos índices de vegetação, refletindo uma redução progressiva da cobertura vegetal. A vegetação diminuiu de 1,143 km² em 2019 para 1,01 km² em 2024. Por outro lado, a mineração aumentou de 3,4 km² para 11,04 km², a urbanização de 1,08 km² para 2,07 km² e as vias de 1,33 km² para 1,58 km². Conclui-se que o aumento das atividades antropogênicas afeta negativamente a produtividade, a densidade e a capacidade fotossintética da vegetação, gerando consequências desfavoráveis para o ecossistema estudado.

Palavras-chave: atividades antropogênicas, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, Índice de Vegetação Melhorado, cobertura vegetal, sensoriamento remoto.

Introducción

Los manantiales, como fuentes naturales de agua subterránea que emergen a la superficie, desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ecológico y la provisión de agua dulce para el consumo humano y actividades económicas (Jung et al., 2024). Estos ecosistemas, vitales para la regulación hídrica y climática, especialmente en zonas rurales, se ven cada vez más afectados por la creciente presión antropogénica. La degradación de los recursos hídricos, un problema global según la Organización de las Naciones Unidas, pone en riesgo más de 1/3 de las reservas de agua dulce del planeta debido a la deforestación, la contaminación y el impacto del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2021).

En América Latina, que alberga aproximadamente el 30% de las reservas de agua dulce del mundo, la gestión inadecuada y las prácticas insostenibles como la conversión de tierras y la deforestación, intensifican la presión sobre las fuentes de agua (Hughes, 2013). En Ecuador, la situación es crítica debido al cambio en el uso del suelo y la falta de un manejo ambiental adecuado, lo que ha provocado la degradación de múltiples fuentes hídricas, afectando la biodiversidad y la productividad agrícola (Koo et al., 2024).

En zonas rurales como La Maná, la presión antropogénica sin regulaciones apropiadas impacta negativamente la sostenibilidad de los ecosistemas locales. Los manantiales de la empresa Smart Alliance, ubicados en este cantón, enfrentan un deterioro progresivo debido a la expansión de la frontera agrícola, la tala de árboles y la ganadería extensiva, lo que ha provocado la pérdida de cobertura vegetal y la alteración del equilibrio hídrico y la calidad del suelo. Estos factores contribuyen al aumento de la erosión y la reducción de la capacidad de autorregulación del ecosistema (Ministerio del Ambiente, 2023).

La degradación ambiental en el área mencionada, caracterizada por la pérdida de vegetación nativa y la presencia de especies invasoras, es impulsada principalmente por actividades antropogénicas no sostenibles. Los manantiales de Smart Alliance en La Maná, Cotopaxi, representan un ecosistema frágil que provee agua de alta calidad y mantiene condiciones favorables para una biodiversidad significativa, pero que depende de un equilibrio hídrico delicado, afectado por actividades humanas como la expansión agrícola, la ganadería y la deforestación (Ministerio de Ambiente, 2016). En este contexto, el objetivo de este proyecto de investigación es evaluar el efecto de la antropización sobre la producción primaria de la vegetación en las áreas que contienen manantiales de Smart Alliance durante los últimos 5 años.

En este contexto, el ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance, ubicado en el cantón La Maná, Ecuador, constituye un sistema ecológico estratégico debido a su capacidad de sostener la

producción primaria de la vegetación y garantizar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, este equilibrio se ve progresivamente alterado por procesos de antropización asociados a la expansión agrícola, la ganadería extensiva y la deforestación, los cuales inciden directamente en la dinámica y productividad vegetal. En este sentido, el objetivo general de la presente investigación es analizar la incidencia de la antropización sobre la productividad de la vegetación en el ecosistema que alberga los manantiales de Smart Alliance, en La Maná – Ecuador, con el propósito de generar bases científicas que contribuyan a la gestión sostenible y conservación de estos sistemas naturales.

1. Materiales y métodos

El proyecto se llevó a cabo en el cantón La Maná, en la provincia Cotopaxi, Ecuador. Los manantiales de Smart Alliance se encuentran localizados en coordenadas geográficas aproximadas de 0°56' S y 79°13' W, a una altitud que varía entre 200 y 400 m.s.n.m. El área de estudio se caracteriza por tener un clima tropical húmedo, con una temperatura promedio anual de 22°C y una precipitación anual que varía entre 1500 y 2000 mm. Las precipitaciones son abundantes entre marzo y mayo, mientras que los meses de julio y agosto presentan una menor incidencia de lluvias.

Diseño de la investigación

La investigación se orienta a un diseño descriptivo y exploratorio, enfocado en caracterizar el estado de la vegetación en función de la antropización. El análisis de datos históricos de Smart Alliance, complementado con datos espaciales, proporcionó una base sólida para comprender el impacto de las actividades humanas en la productividad de la vegetación, sin intervención directa en el ecosistema. Dividiendo la investigación en tres fases de acuerdo con los objetivos específicos.

Comparaciones y evaluaciones del efecto de la antropización sobre la productividad del ecosistema

Adicionalmente, se llevaron a cabo comparaciones y evaluaciones del efecto de la antropización sobre la productividad del ecosistema, a través de la relación entre el índice espectral de urbanización (IBI) y el EVI y NDVI, utilizando el software XLStat, complemento de Microsoft Excel. Existen varios índices de urbanización como el NDBI, sin embargo, Estoque y Murayama (2015) consideran que el NDBI no es capaz de discriminar la información con precisión en escenarios donde la vegetación seca se puede confundir con suelo urbano. Por ello, Xu (2008) propone un nuevo índice de construcción, el index-based built-up index (IBI). Este índice se construye a partir del NDBI, del índice de vegetación ajustada al suelo (soil adjusted vegetation index [SAVI]) y del índice modificado de agua de diferencia normalizada (modified normalized difference water index [MNDWI]). Así, se consideran los tipos de suelo presentes en un área urbana (construcciones, vegetación y agua), donde el IBI busca mejorar la detección y el mapeo de cubiertas urbanas.

Este índice oscila entre -1 y 1, valores bajos representan las zonas sin urbanizar; es decir, donde hay presencia de coberturas vegetales. Mientras que los valores más altos del índice IBI, representan las zonas con mayor presencia de zonas urbanizadas.

Instrumentos de Investigación

Para cumplir con los objetivos del proyecto, se utilizaron los siguientes instrumentos y procedimientos:

Herramientas SIG

Se usó el software ArcGIS para procesar y analizar los datos espaciales históricos. Este análisis facilitó la evaluación de cambios en la cobertura vegetal y permitió identificar patrones espaciales en la relación entre la antropización y la vegetación.

Análisis de datos históricos

Se emplearon métodos estadísticos para analizar la cobertura de la vegetación en el ecosistema de estudio de Smart Alliance, con el fin de establecer correlaciones entre las actividades antropogénicas y la productividad de la vegetación.

Tratamiento de los Datos

Los datos fueron descritos a partir de los valores medios y su error estándar, además de la dispersión global evaluada por la desviación estándar. Los

datos no siguieron una distribución normal (prueba de Kolmogorov-Smirnov) por lo que se emplearon pruebas no paramétricas.

2. Resultados y discusión

Los resultados de este proyecto de investigación proporcionan una visión integral sobre cómo las prácticas humanas han afectado tanto la vegetación como la funcionalidad del ecosistema, ofreciendo una base sólida para futuras estrategias de manejo y conservación. A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los objetivos específicos.

Actividades antropogénicas que se han llevado a cabo en el ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance en La Maná, durante los últimos 5 años

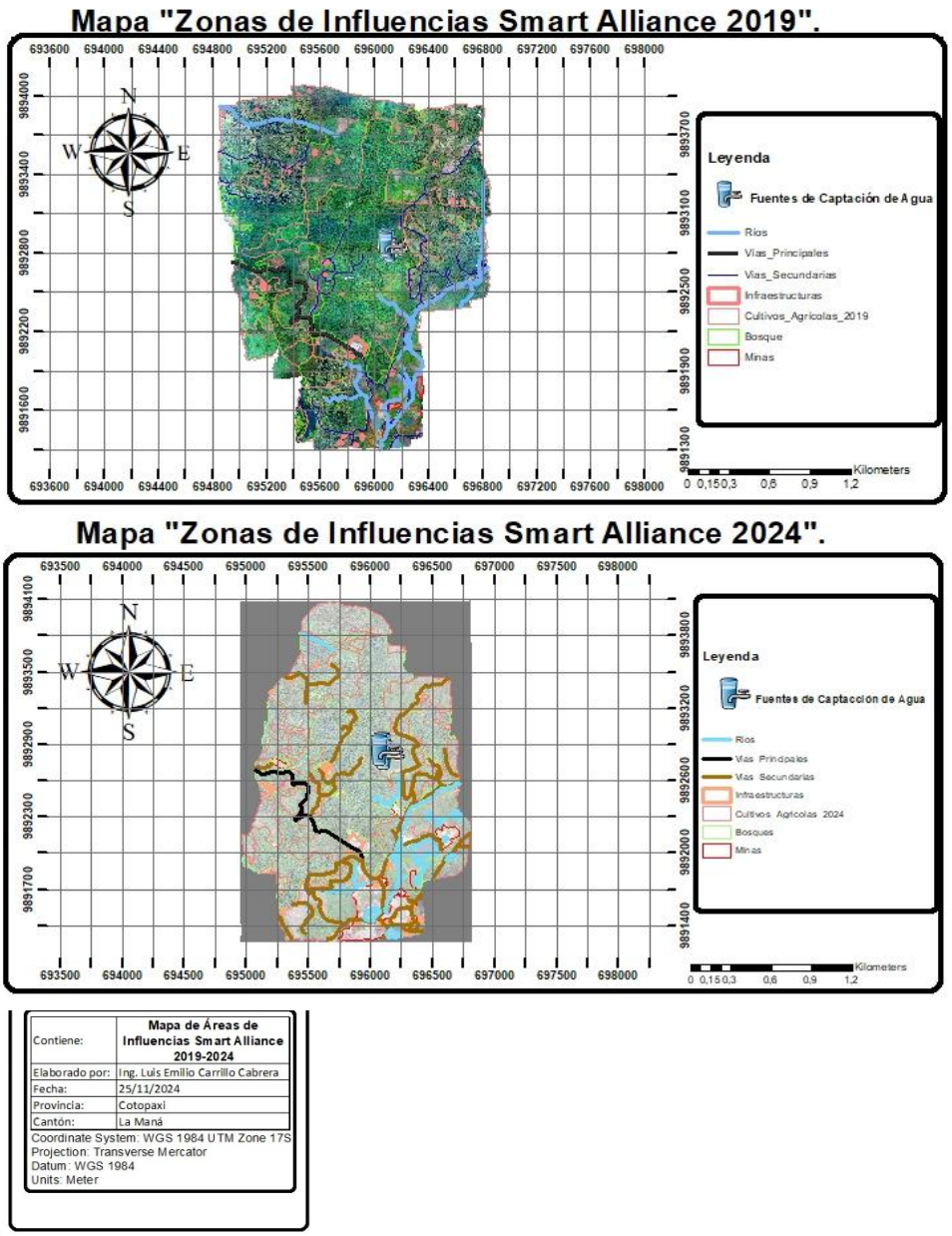
Durante los últimos cinco años, diversas actividades antropogénicas han tenido lugar en el ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance en La Maná. La comparación entre las áreas en dos años destacó una evolución de la degradación desde 2019 hasta 2024. Hubo una disminución de los recursos hídricos en la zona, así como el avance de la degradación ambiental, exacerbada por el incremento de actividades agrícolas y la expansión de vías secundarias. Estos factores han afectado al ecosistema, reduciendo tanto la calidad como la cantidad de agua disponible en el área, mientras que las infraestructuras humanas han invadido progresivamente el territorio anteriormente menos alterado.

Cabe mencionar que cuando se hace la determinación del uso de suelo en dicha área de estudio, se determina que es netamente agrícola. Con las

ortofotos, no se puede determinar el tipo de cultivo pero si el uso que hay actualmente de suelo, por eso, se clasificó en bosque, zona agrícola, minas, vías, infraestructuras (Figura 1).

creative commons
BY NC SA

Figura 1. Dinámica del uso de suelo en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador



Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance (Realizado en ArcGIS)

Respecto al uso de suelo, las áreas de influencia a los manantiales de Smart Alliance tienen actividades antropogénicas como los cultivos agrícolas. Entre ellos se destacan el maíz, cacao, café y banano. En el 2019, las áreas ocupadas para cultivos agrícolas eran de menor extensión. Los parches de cultivos con mayor extensión alcanzaron 1018,00 km^2 y de menor tamaño fue 11,00 km^2. En el 2024, las cobertura agrícola se expandió, pero los parches fueron de menor tamaño desde 159,00 km^2 hasta 4,00 km^2 (Figura 2). Los parches de color claro representan menor extensión, los de color un poco más oscuro representan extensión media, y los parches de colores fuertes son los de mayor afectación.

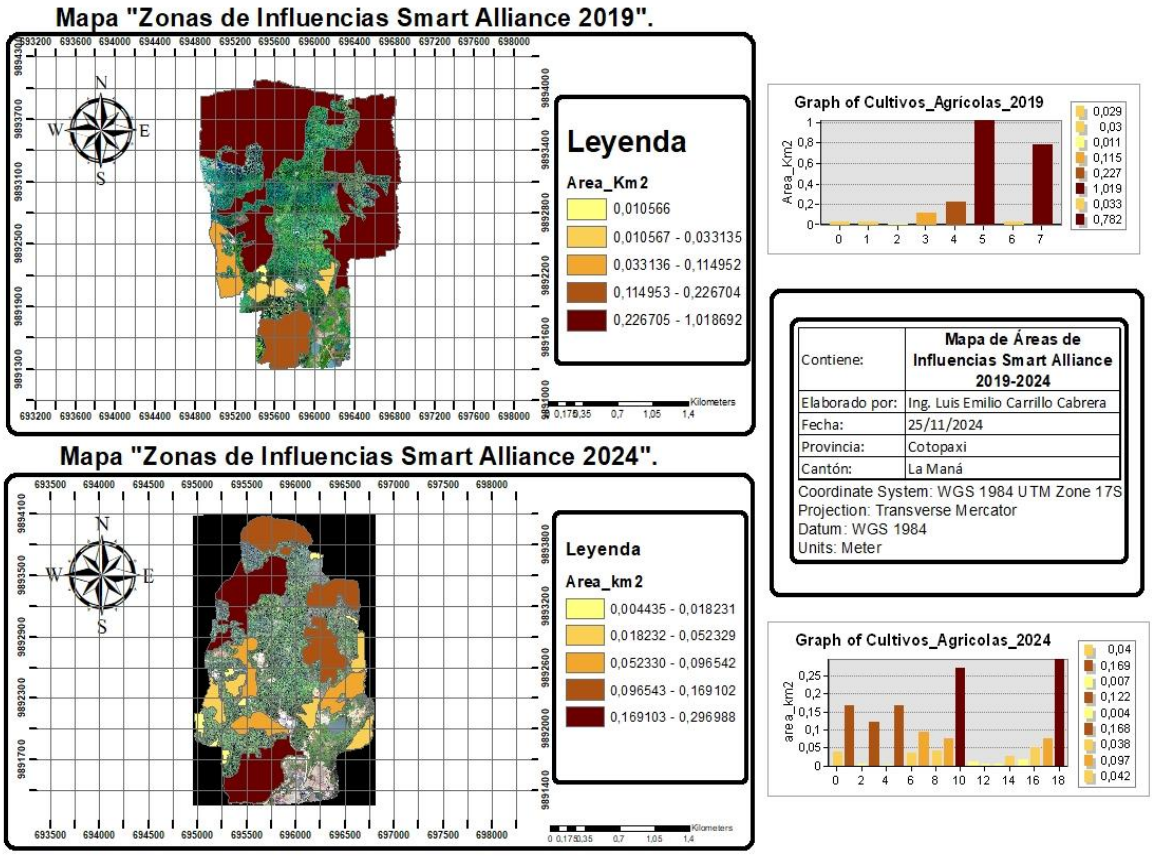


Figura 2. Dinámica de expansión agrícola en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador

Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance

Con relación al bosque, en 2019 la extensión ocupada era mayor, con parches de 1,143 km^2 y los menores de 0,01 km^2. En 2024 la extensión de bosques se redujo, con parches de 1,01 km^2 y los menores de 0,02 km^2. Los parches de color claro representan menor extensión, los de color un poco

más oscuro representan extensión media, y los parches de colores fuertes son los de mayor afectación.

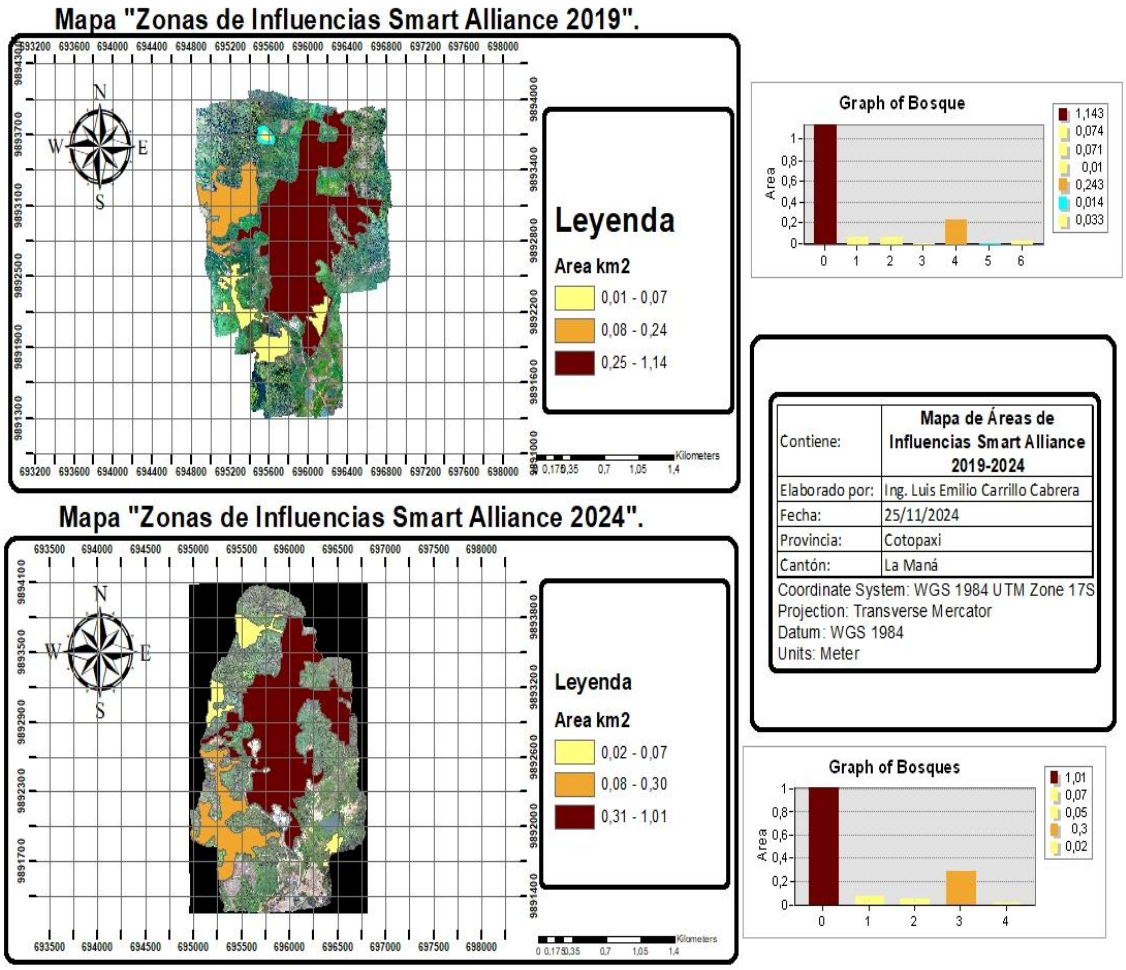


Figura 3. Dinámica de extensión del bosque en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador

Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance.

Las zonas mineras en el 2019 eran reducidas, la mayor área ocupó 3,408 km^2 y la menor 0,653 km^2. Sin embargo, en el 2024 se duplicó la extensión con zonas de 11,04 km^2. Los parches de color claro representan menor extensión, los de color un poco más oscuro representan extensión media, y los parches de colores fuertes son los de mayor afectación.

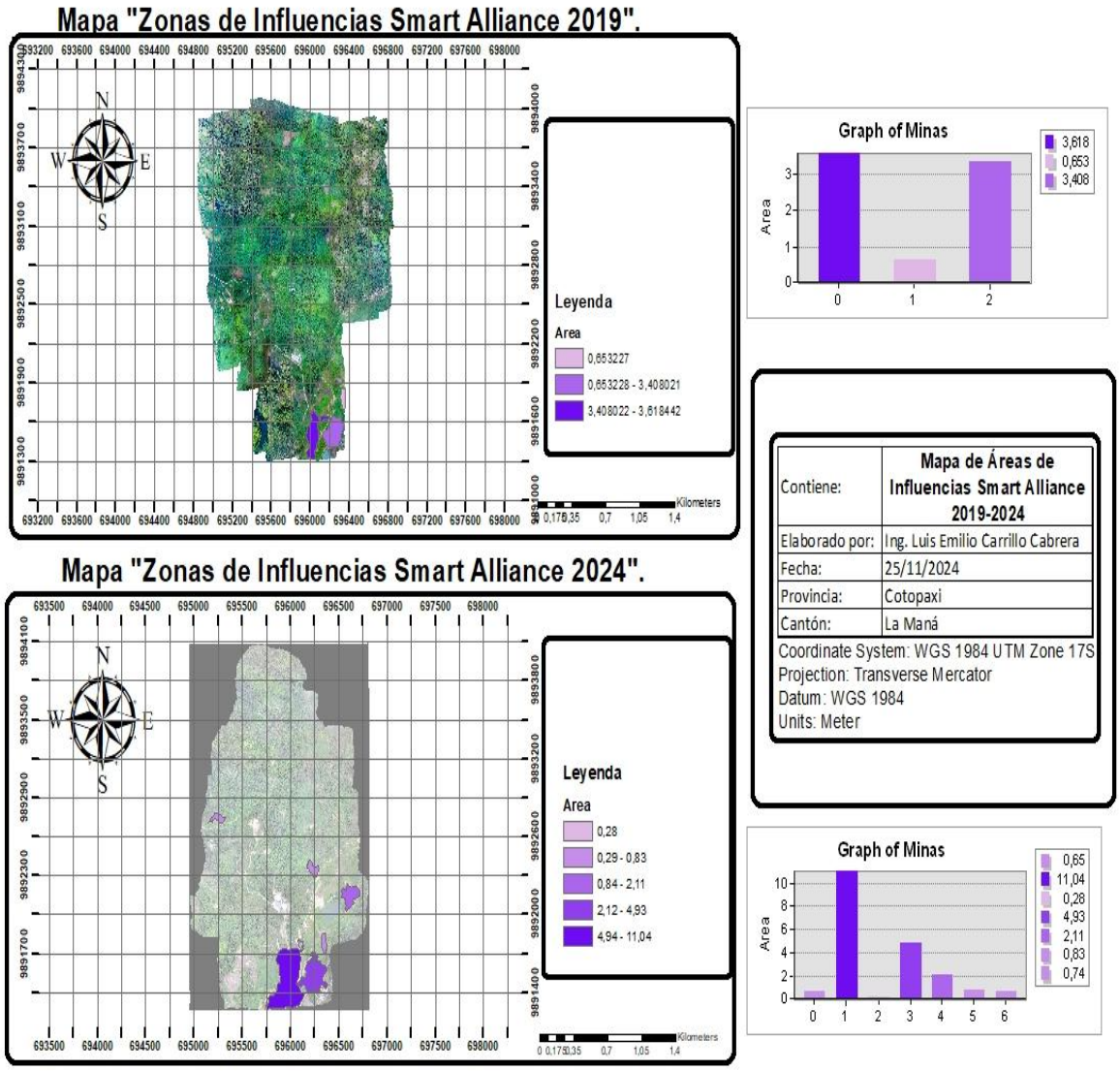


Figura 4. Dinámica expansión de la zona minera en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador

Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance (Realizado en ArcGIS)

Las áreas de influencia de uso de suelo en relación con la infraestructura en el 2019 fueron de 1,0889 km^2 el espacio más ocupado y el menos ocupado fue de 0,065614 km^2. En el 2024, el espacio más ocupado fue de 2,0697 km^2 y el menor fue de 0,006561 km^2. Cabe recalcar que el espacio más ocupado representa a la planta industrial de Smart Alliance, caracterizando dentro del área ocupada casas, galpones, industrias entre otros, las áreas menores no son visibles en el mapa debido a la resolución de la ortofoto, el área que se puede apreciar es la ya mencionada, la empresa Smart Alliance y el hotel de la misma empresa. Los parches de color claro representan menor extensión, los de color un poco más oscuro representan extensión media, y los parches de colores fuertes son los de mayor afectación.

creative commons
BY NC SA

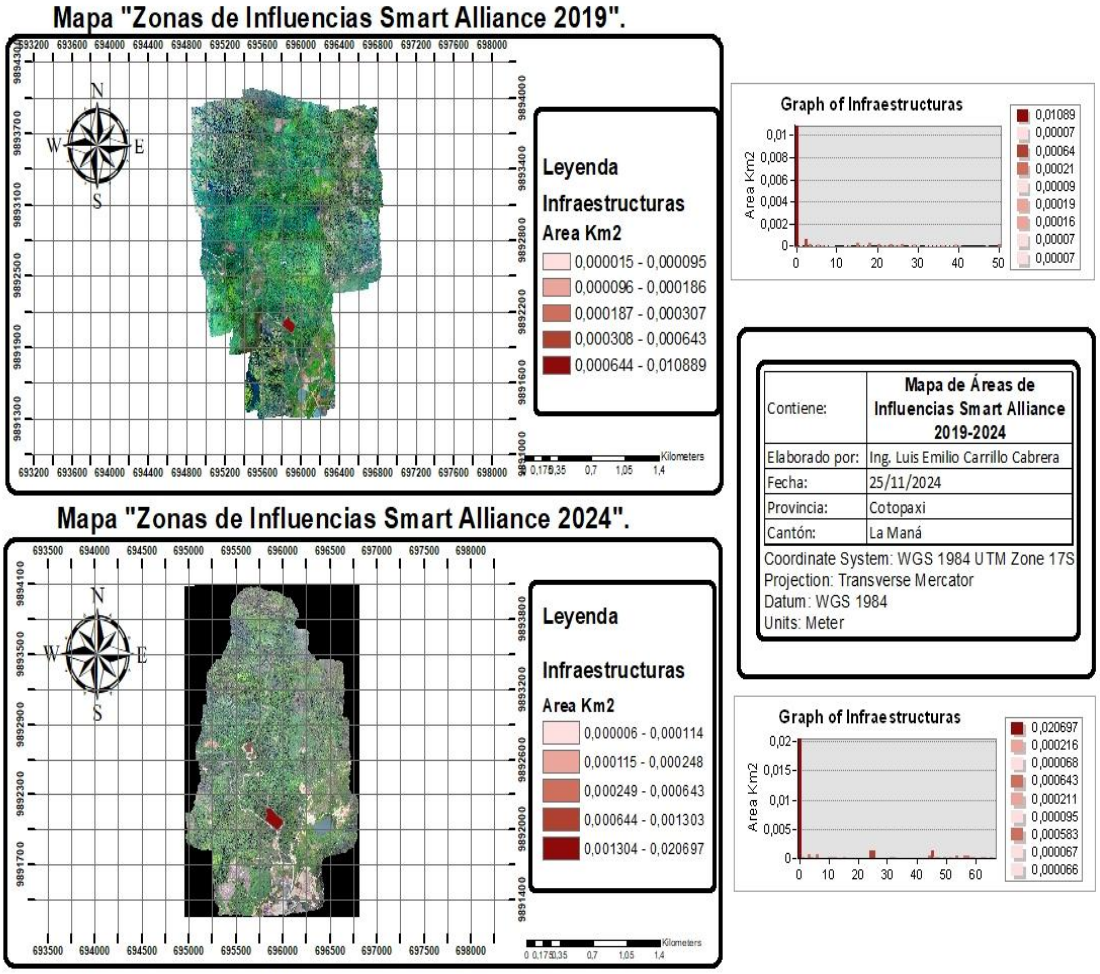


Figura 5. Dinámica del uso de suelo dedicado a infraestructuras en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador

Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance

La densidad de las vías en el 2019 fue de 1,33 km^2 y en el 2024 fue de 1,58 km^2, indicando que con el pasar de los años han implementado vías para la transportación en el área de influencia de los manantiales de Smart Alliance.

El área de los ríos medidos en km se caracteriza por la disminución hídrica acontecida por la degradación del ambiente en las áreas de influencia del manantial de Smart Alliance, siendo en el 2019 de 0,975 la mayor área en km y la menor de 0,064, mientras que en el 2024 la mayor fue de 0,778 y la menor de 0,042. Con esto se infiere que las actividades antropogénicas caracterizadas en el área de influencia de los manantiales de Smart Alliance son los cultivos agrícolas, bosque, actividades mineras, transportación (vías) e infraestructura (construcciones). Recalcando que las medidas menores de 1, observadas en la fotografía se debe a que puede ser canales usados para el desvío de aguas en las minas.

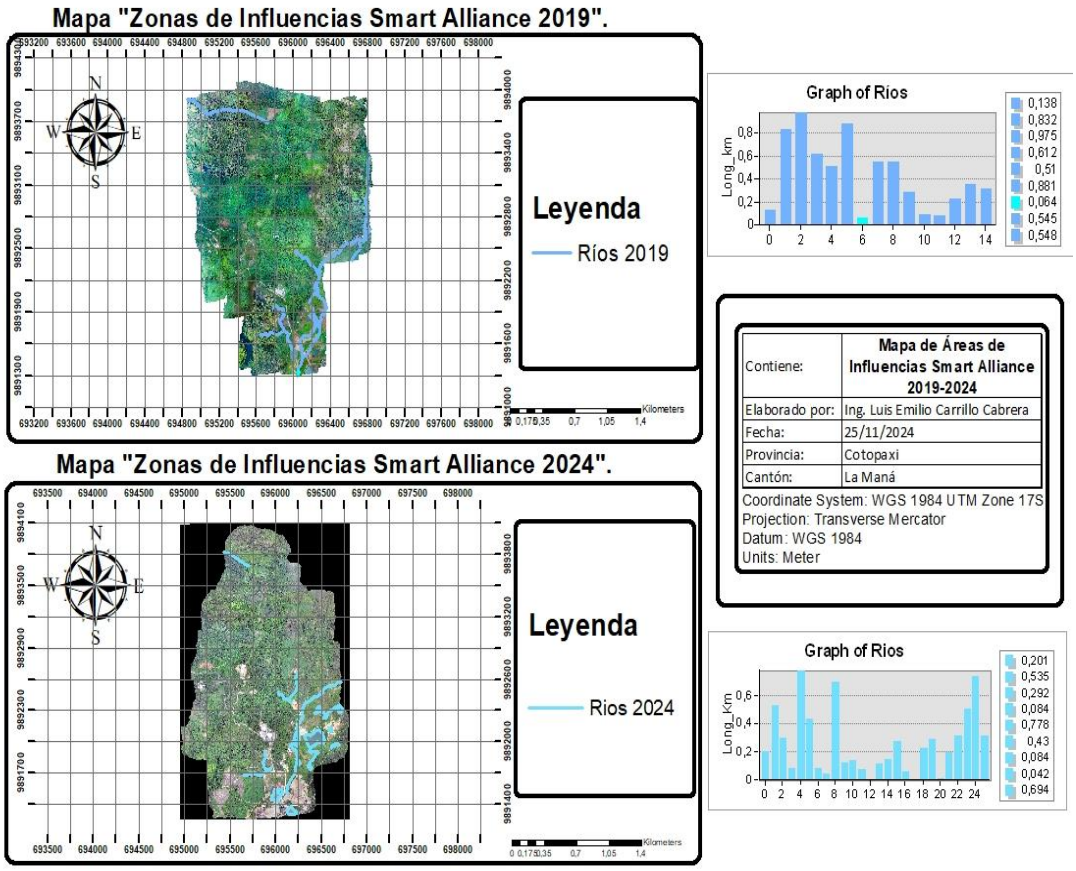


Figura 6. Dinámica de los ríos en el ecosistema que alberga el manantial de la empresa Smart Alliance entre el 2019 y 2024, La Maná, Cotopaxi, Ecuador

Leyenda: Imágenes obtenidas de la empresa Smart Alliance

Cambios espaciotemporales de la productividad de la vegetación en el ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance en La Maná, durante los últimos 5 años”

creative commons
BY NC SA

Los datos de EVI y NDVI no se ajustaron a una distribución normal. Los estadísticos descriptivos de estos índices por usos de suelo fueron similares. Los bosques y cultivos tuvieron valores intermedios, muy cercanos tanto para el EVI_{bosque} = 0,274, $EVI_{cultivos}$ = 0,269 como para el $NDVI_{bosque}$ = 0,371 y $NDVI_{cultivo}$ = 0,367).

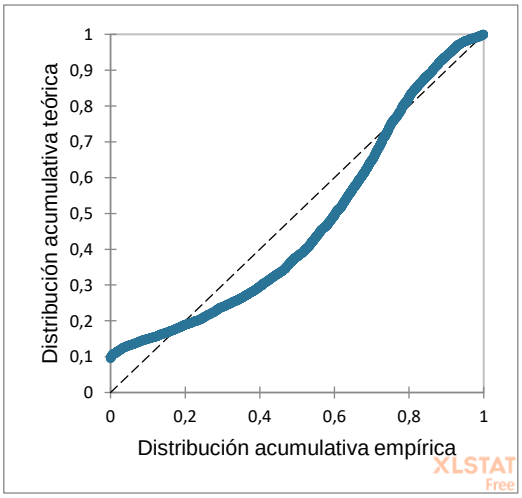


Figura 7. Distribución de datos del Índice de vegetación de diferencias normalizadas.

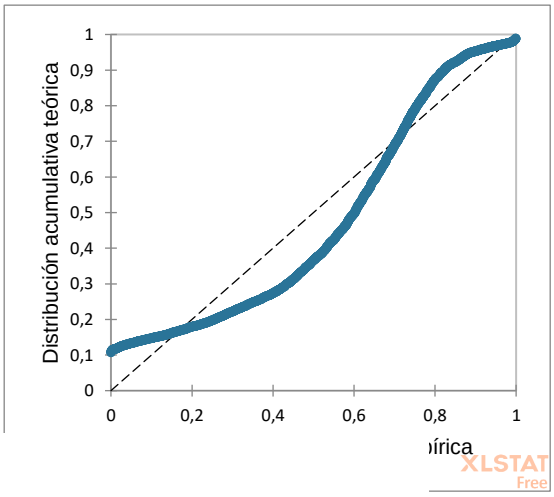


Figura 8. Distribución de datos del Índice de vegetación mejorado.

El análisis del índice de vegetación EVI en el cantón La Maná reveló diferencias no significativas entre bosques y cultivos. Los descriptivos mostraron una alta variabilidad en los valores de EVI para ambos usos de suelo, evidenciando una respuesta diferenciada de la vegetación a factores ambientales y de manejo. El dispersigrama confirma esta observación, mostrando una alta dispersión de los datos en ambos grupos. Asociado a

esta variabilidad las pequeñas variaciones en cuanto al valor medio del índice no fueron significativas (Mann-Whitney U= 6581362,500; p=0.495). Sin embargo, la distribución y rango de los valores sugieren que los bosques podrían presentar valores de EVI ligeramente superiores, lo que podría indicar una mayor biomasa y vigor de la vegetación en comparación con los cultivos.

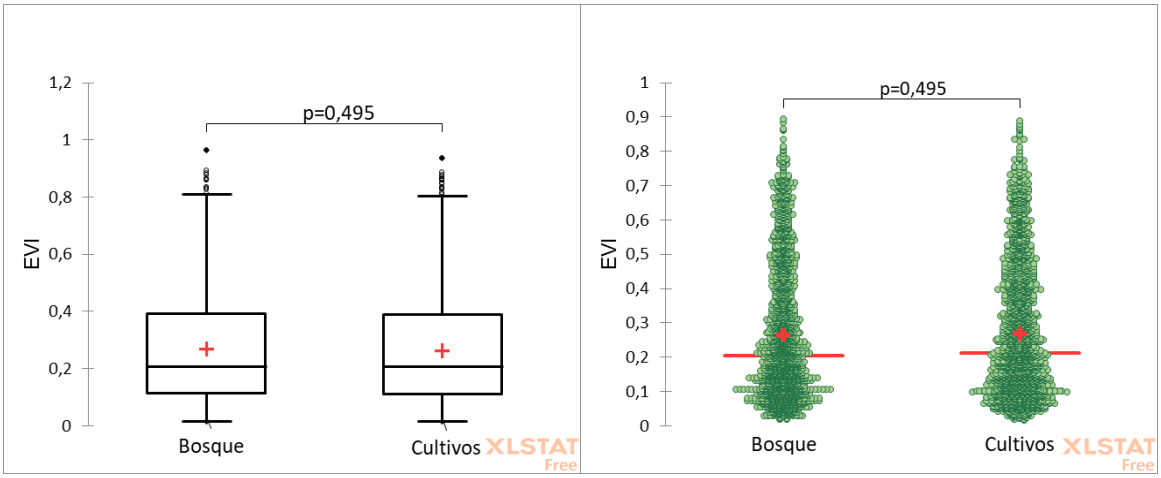


Figura 9. Descriptivos del índice de vegetación EVI y dispersigrama de los datos en diferentes usos de suelo de los manantiales Smart Alliance, cantón La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2019-2024

Los resultados del NDVI fueron similares al EVI. No hubo diferencias entre el bosque y los cultivos (Mann-Whitney U= 6579459; p=0,508; Figura 12), aunque la dispersión de los datos fue alta.

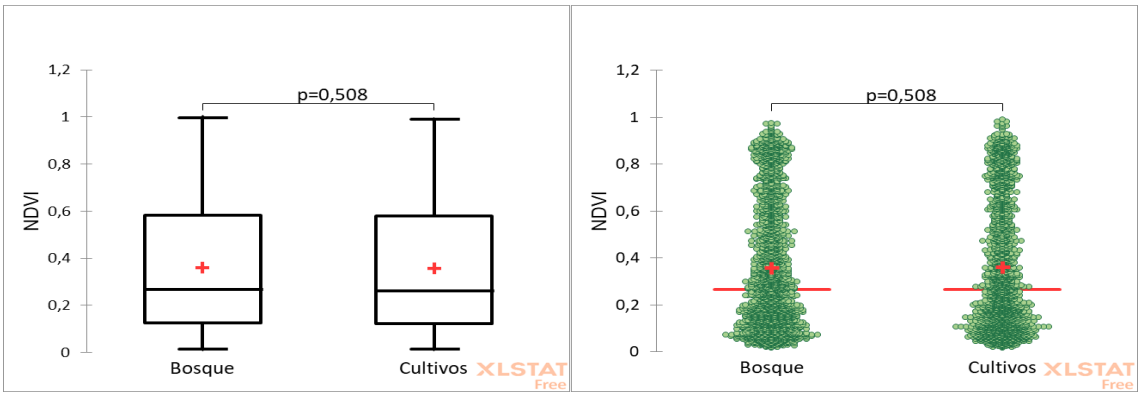


Figura 10. Descriptivos del índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI y dispersigrama de los datos en diferentes usos de suelo de los manantiales Smart Alliance, cantón La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2019-2024

Los descriptivos mensuales de EVI y NDVI, mostraron variaciones de medias en marzo y noviembre durante el periodo 2019-2024. El análisis de los descriptivos mensuales del Índice de Vegetación EVI y el dispersigrama de los datos en la zona de los manantiales de Smart Alliance, reveló una variabilidad temporal considerable en la actividad de la vegetación. Los diagramas de cajas mostraron una fluctuación mensual en los valores de EVI, lo que sugiere una respuesta dinámica de la vegetación a factores ambientales estacionales, como la disponibilidad de agua, la temperatura y la radiación solar. La presencia de valores atípicos en algunos meses indica eventos o condiciones particulares que afectan la reflectancia espectral de la vegetación, como cambios en el uso del suelo, fenómenos meteorológicos extremos o brotes de plagas. El dispersigrama confirma la variabilidad observada en los diagramas de cajas y revela patrones de dispersión que varían a lo largo del año.

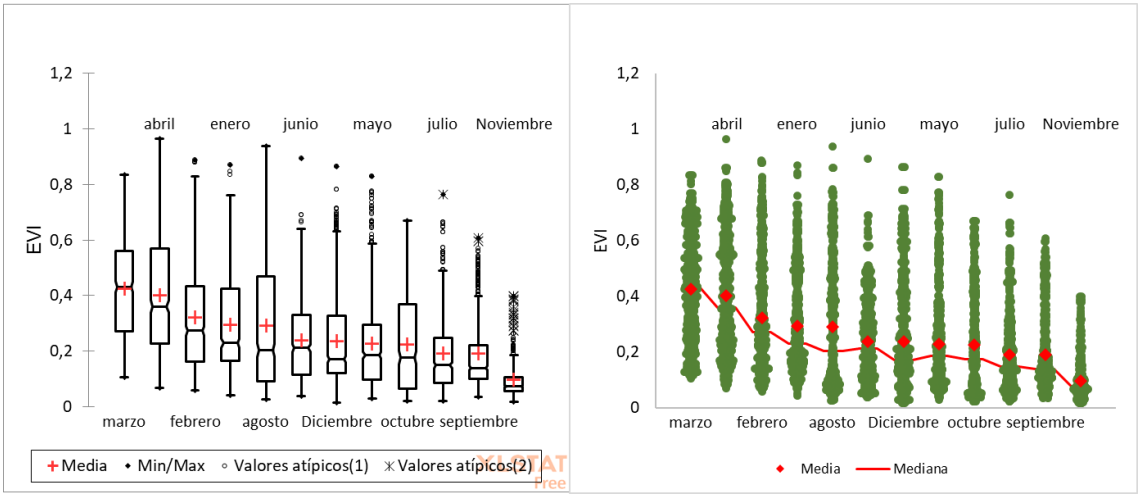


Figura 11. Descriptivos mensuales del índice de vegetación EVI y dispersigrama de los datos en la zona de los manantiales Smart Alliance, cantón La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2019-2024

Los valores de NDVI a lo largo de los meses tuvieron el mismo patrón de variación respecto al EVI, esto sugiere que la vegetación experimenta cambios importantes en su salud y actividad fotosintética a lo largo del año. Es probable que esta variación esté relacionada con factores estacionales como la disponibilidad de agua, la temperatura y la radiación solar. Los meses con valores de NDVI más altos indican períodos de mayor crecimiento y actividad, mientras que los meses con valores más bajos podrían corresponder a períodos de menor crecimiento o estrés hídrico. Los meses con mayor dispersión podrían indicar una mayor heterogeneidad en la respuesta de la vegetación a los factores ambientales.

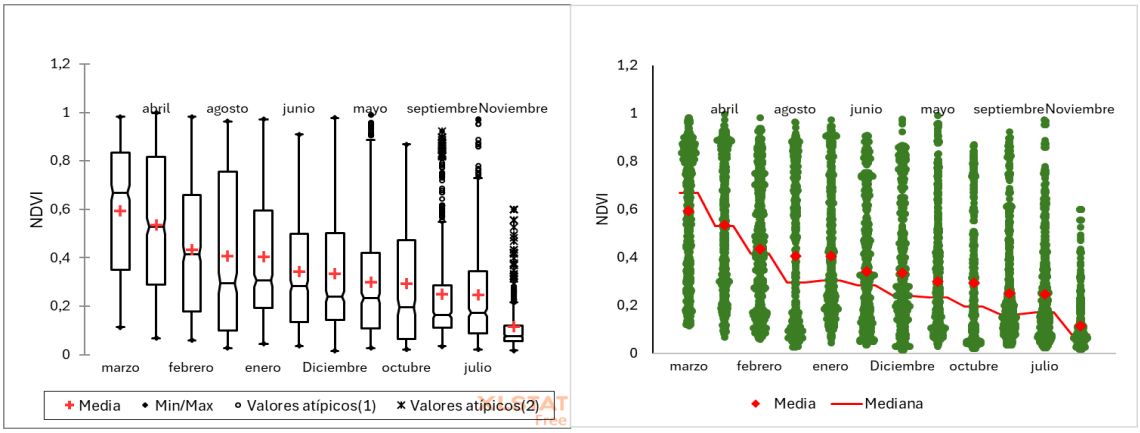


Figura 12. Descriptivos mensuales del índice de vegetación de diferencia normalizada y dispersigrama de los datos en la zona de los manantiales de Smart Alliance, cantón La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2019-2024

Se observó un incremento general del EVI y el NDVI en el 2023, lo que sugiere una tendencia positiva en la actividad fotosintética de la vegetación. No obstante, se identifican variaciones interanuales que podrían atribuirse a cambios en las condiciones climáticas. La disminución del EVI y del NDVI en 2024 se corresponde con la tendencia anual entre 2018 y 2022. El comportamiento anual fue similar en bosques y cultivos.

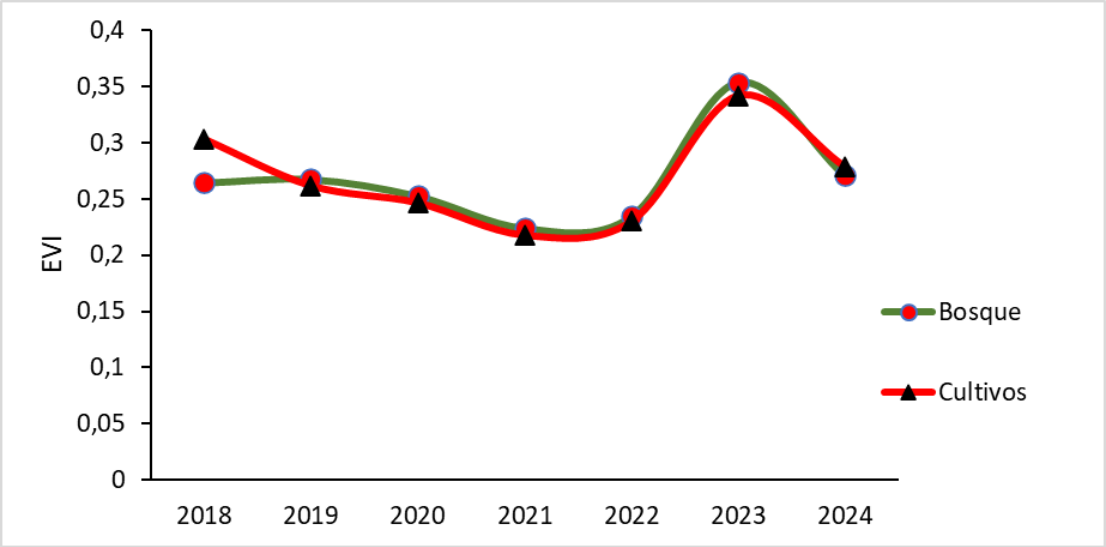


Figura 13. Dinámica del índice mejorado de vegetación (EVI) en el ecosistema de manantiales de la región Sierra, La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2018-2024

creative commons
BY NC SA

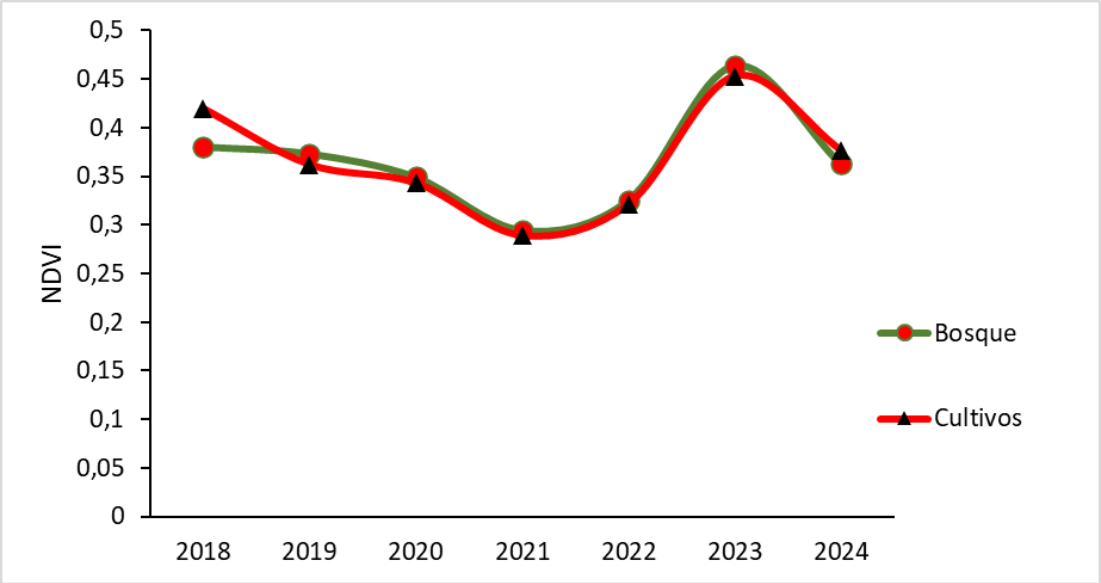


Figura 14. Dinámica del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el ecosistema manantiales de la región Sierra, La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2018-2024

La figura 14 revela patrones fenológicos distintivos y una considerable variabilidad interanual. Se observó una fluctuación estacional del NDVI, con valores generalmente más altos durante los meses de mayor precipitación y temperatura, lo que sugiere una respuesta directa de la vegetación a las condiciones climáticas. Los picos de NDVI en ciertos años podrían indicar condiciones ambientales particularmente favorables para el crecimiento de la vegetación, mientras que los valores más bajos podrían reflejar períodos de estrés hídrico o limitaciones de otros recursos. La amplitud de la variación

mensual también parece variar entre años, lo que sugiere una sensibilidad diferencial de la vegetación a las fluctuaciones ambientales.

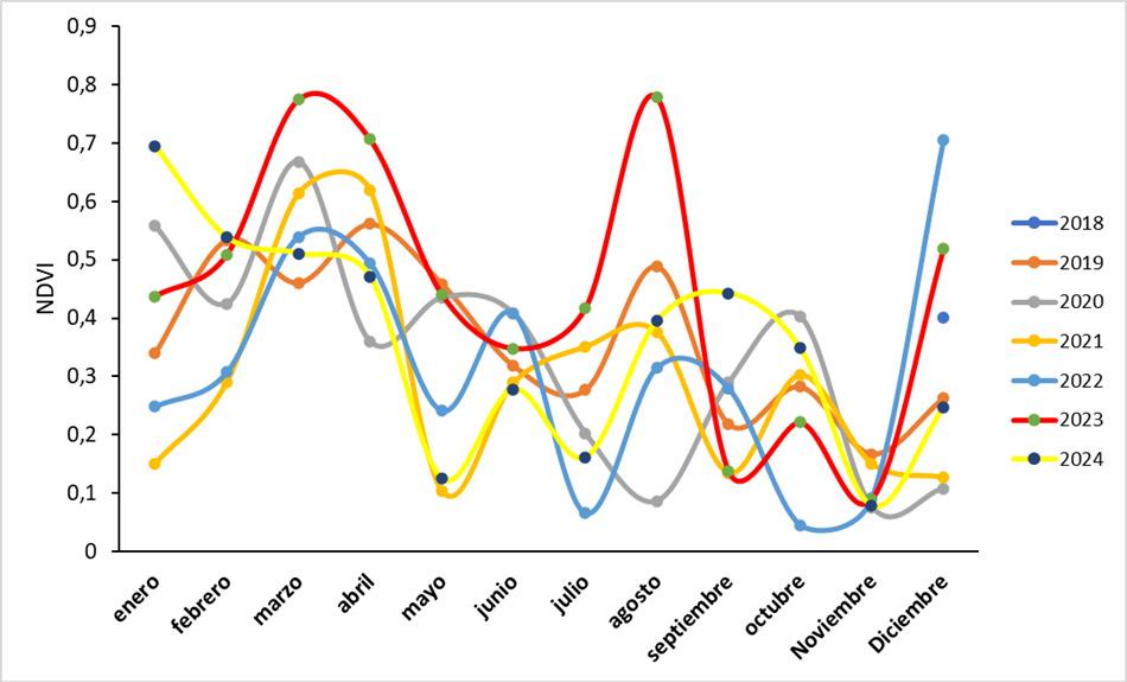


Figura 15. Variación mensual del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el ecosistema manantial de la región Sierra, La Maná, Cotopaxi, Ecuador, durante el periodo 2018-2024.

La variabilidad interanual en los valores de EVI y NDVI para ambos usos de suelo fue similar. Ambos índices tuvieron valores bajos en 2021 y 2022. Se destacó el 2018, con valores más altos en la zona de cultivos a diferencia del resto de años donde los valores medios fueron similares entre usos de suelo. Este patrón también fue observado en el NDVI. Es fundamental considerar que el EVI es sensible a variables como la fenología de los cultivos, las prácticas agrícolas, los eventos meteorológicos extremos y los cambios en el

uso del suelo. Por lo tanto, las variaciones observadas podrían ser el resultado de una combinación de factores naturales y antrópicos.

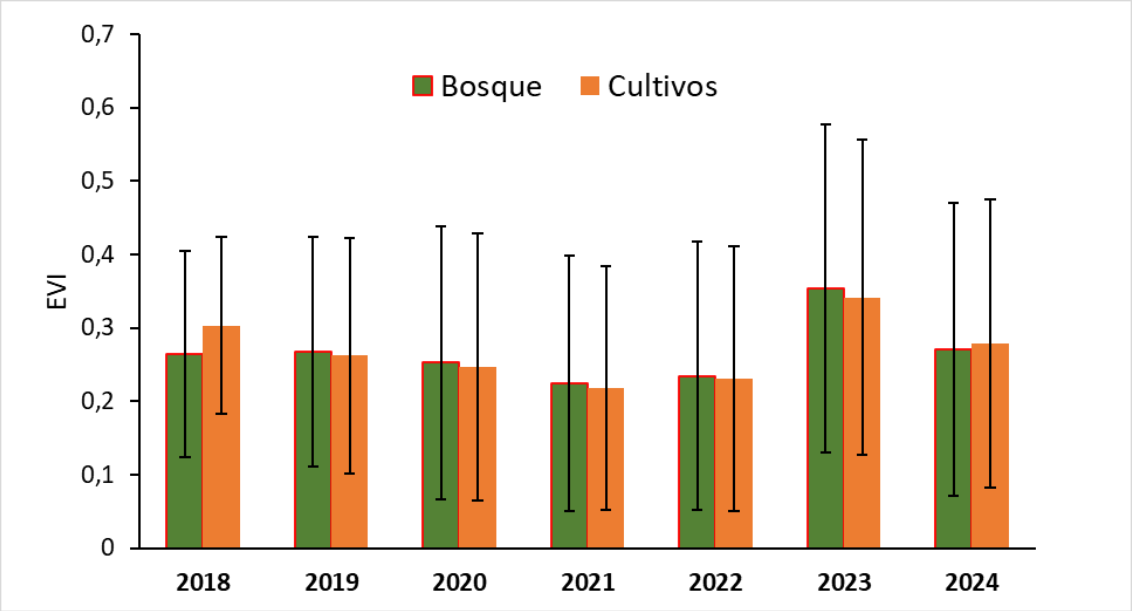


Figura 16. Variación anual del EVI por usos de suelo

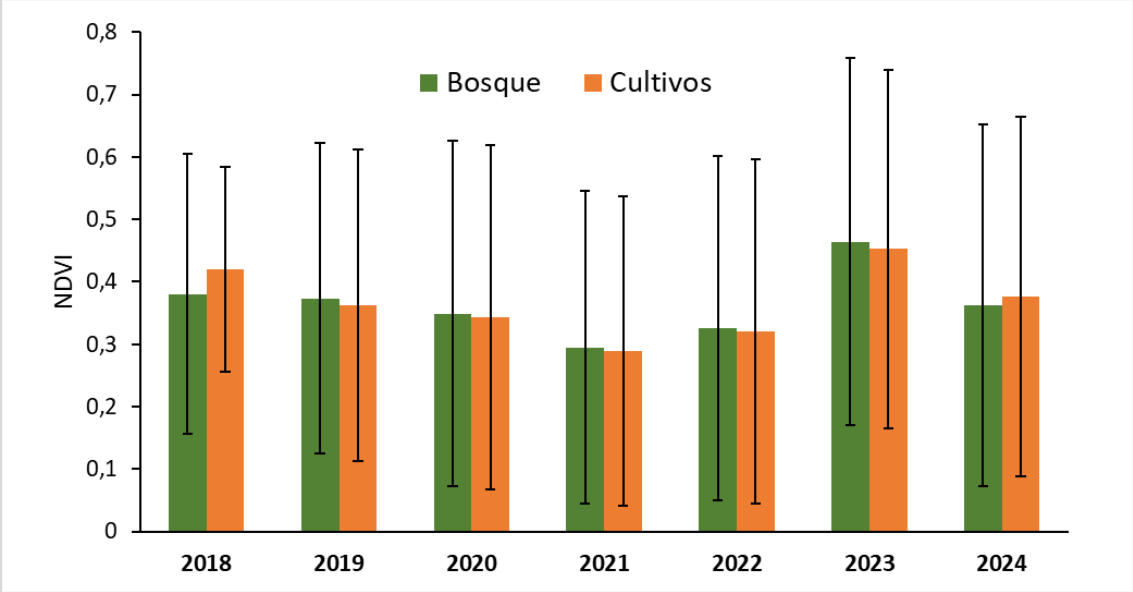


Figura 17. Variación anual del NDVI por usos de suelo

Índice de urbanización

El índice de urbanización permite medir el grado de urbanización en el área urbana en comparación con las zonas rurales del área de influencia de los manantiales de Smart Alliance. A través de este, se comprenden los patrones de crecimiento urbano e identifica la presión sobre el ecosistema, el consumo de recursos naturales asociados a la densidad poblacional y el desarrollo de infraestructuras y servicios con la expansión de la ciudad.

La tabla 5 muestra los estadísticos descriptivos del índice espectral de urbanización de los diferentes usos de suelo de la zona estudiada indicando que la minería presentó la media de IBI más alta (0,41 ± 0,11), sugiriendo

mayor urbanización, aunque seguida de cerca por infraestructura (0,38 ± 0,15). Los menores valores fueron observados en el bosque (0,37 ± 0,12).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del índice espectral de urbanización en diferentes usos de suelo dentro del ecosistema que alberga los manantiales de Smart Alliance, La Maná, Cotopaxi, entre 2019 y 2024.

Categoría	N	Mínimo	Máximo	Media	SD	CV	EE
Minería	876	0,098	0,773	0,407	0,110	0,269	0,004
Infraestructura	4891	-0,027	0,844	0,384	0,154	0,402	0,002
Cultivos	1971	0,048	0,718	0,379	0,114	0,301	0,003
Bosque	1825	0,004	0,751	0,374	0,117	0,313	0,003

Leyenda: N: número de observaciones; SD: desviación estándar; CV: coeficiente de variación; EE: error estándar.

Según la prueba de Krusbal-Wallis existieron diferencias significativas en el índice de urbanización entre los diferentes usos de suelo. La infraestructura y la minería tuvieron los índices de urbanización más altos, lo que indica que son las áreas más urbanizadas. Los bosques y los cultivos tuvieron índices de urbanización más bajos, como era de esperar. Sin embargo, los valores del IBI para bosques, cultivos e infraestructura no tuvieron diferencias.

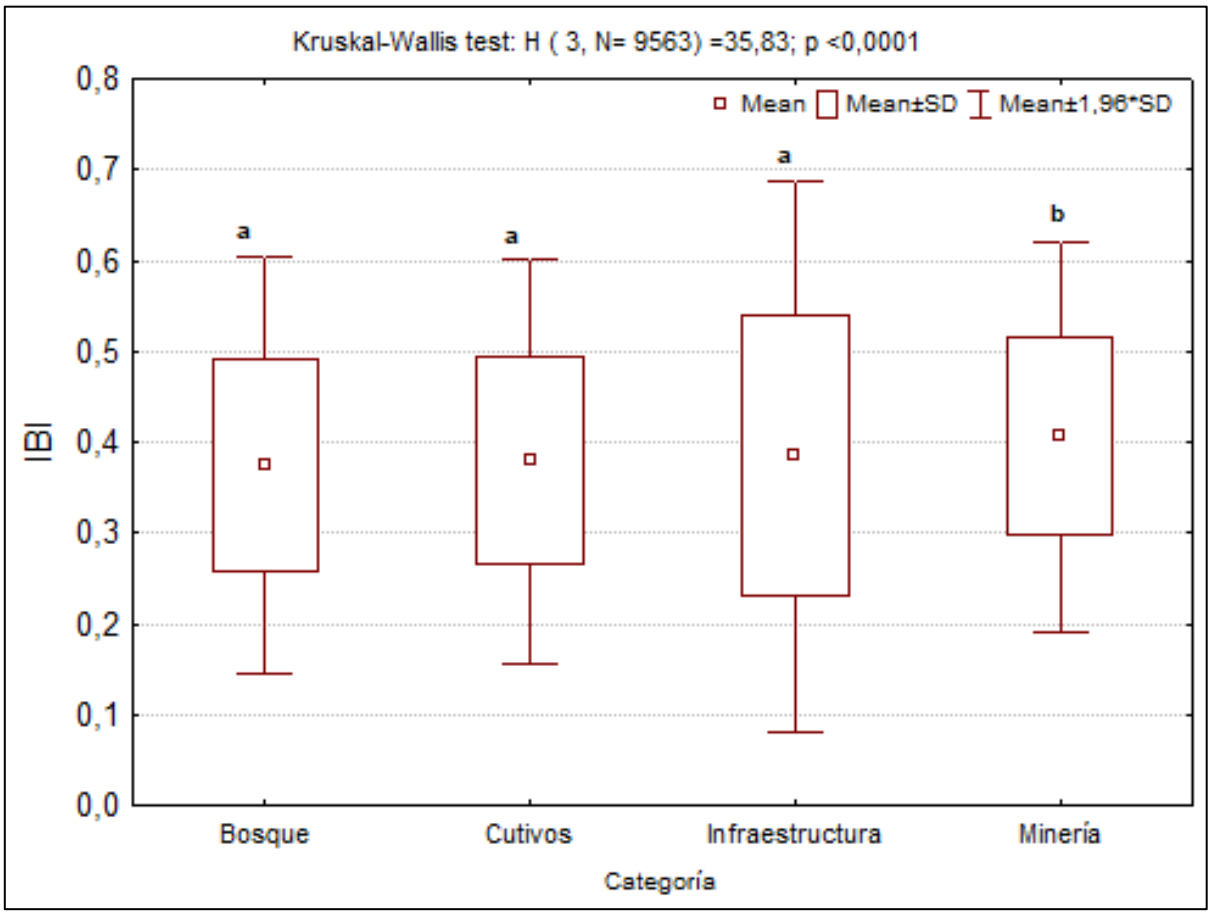


Figura 18. Variación del índice espectral de vegetación entre los diferentes usos se suelo presentes en el ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance, La Maná, Cotopaxi, durante el 2019 al 2024.

Leyenda: Letras diferentes indican diferencias significativas, según la prueba Kruskal Wallis.

La figura 19 muestra la variación del IBI a lo largo del ciclo anual en el periodo de estudio. Se observó una clara variación estacional en los valores de IBI, con una tendencia general a aumentar desde abril hasta alcanzar su punto máximo en septiembre. La dispersión de los puntos en cada mes indica la variabilidad de los valores de IBI, con algunos meses mostrando una mayor fluctuación que otros.

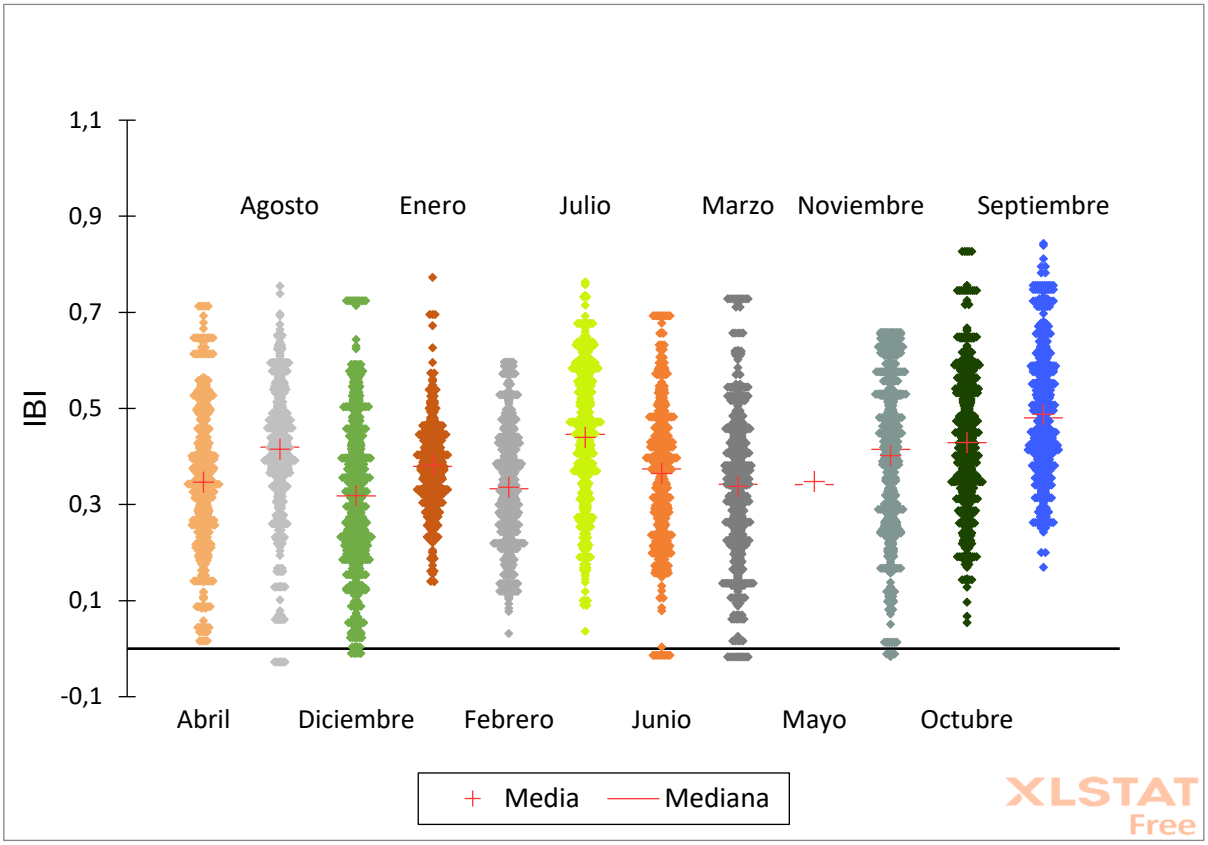


Figura 19. Dispersigrama de los datos del índice espectral de urbanización (IBI), a lo largo de los meses, en el ecosistema alberga los manantiales de Smart Alliance, La Maná, Cotopaxi, entre 2019 y 2024.

La figura 20 presenta la variación del IBI (índice de Urbanización) a lo largo de un período de siete años, desde 2018 hasta 2024. Los valores de IBI mostraron una ligera oscilación con el tiempo. La dispersión de los puntos en cada año indica la variabilidad de los valores de IBI durante ese período, y se puede notar que algunos años muestran una mayor variabilidad que otros. El mayor valor medio del IBI se observó en el 2019, seguido de 2021 y 2024.

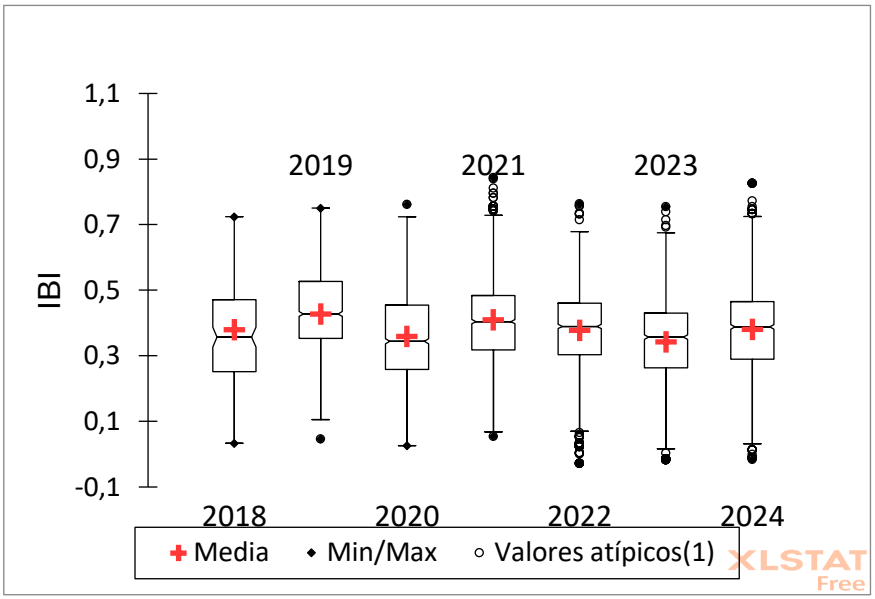


Figura 20. Variación anual del índice espectral de urbanización en diferentes puntos del ecosistema que alberga los manantiales de la empresa Smart Alliance, La Maná, Cotopaxi

La correlación de Spearman entre los índices espectrales EVI, NDVI e IBI para el ecosistema que contiene los manantiales de Smart Alliance durante 2019-2024, fue positiva muy fuerte (0.970) entre EVI y NDVI, lo que indica que ambos índices varían de manera similar y miden aspectos relacionados de la vegetación. Por otro lado, la correlación entre IBI y los índices de vegetación es muy débil (0.027 con EVI y 0.103 con NDVI), lo que sugiere que la urbanización no está fuertemente relacionada con la presencia de vegetación en este ecosistema, es decir, la presencia de vegetación no implica necesariamente un mayor o menor grado de urbanización, y viceversa.

creative commons
BY NC SA

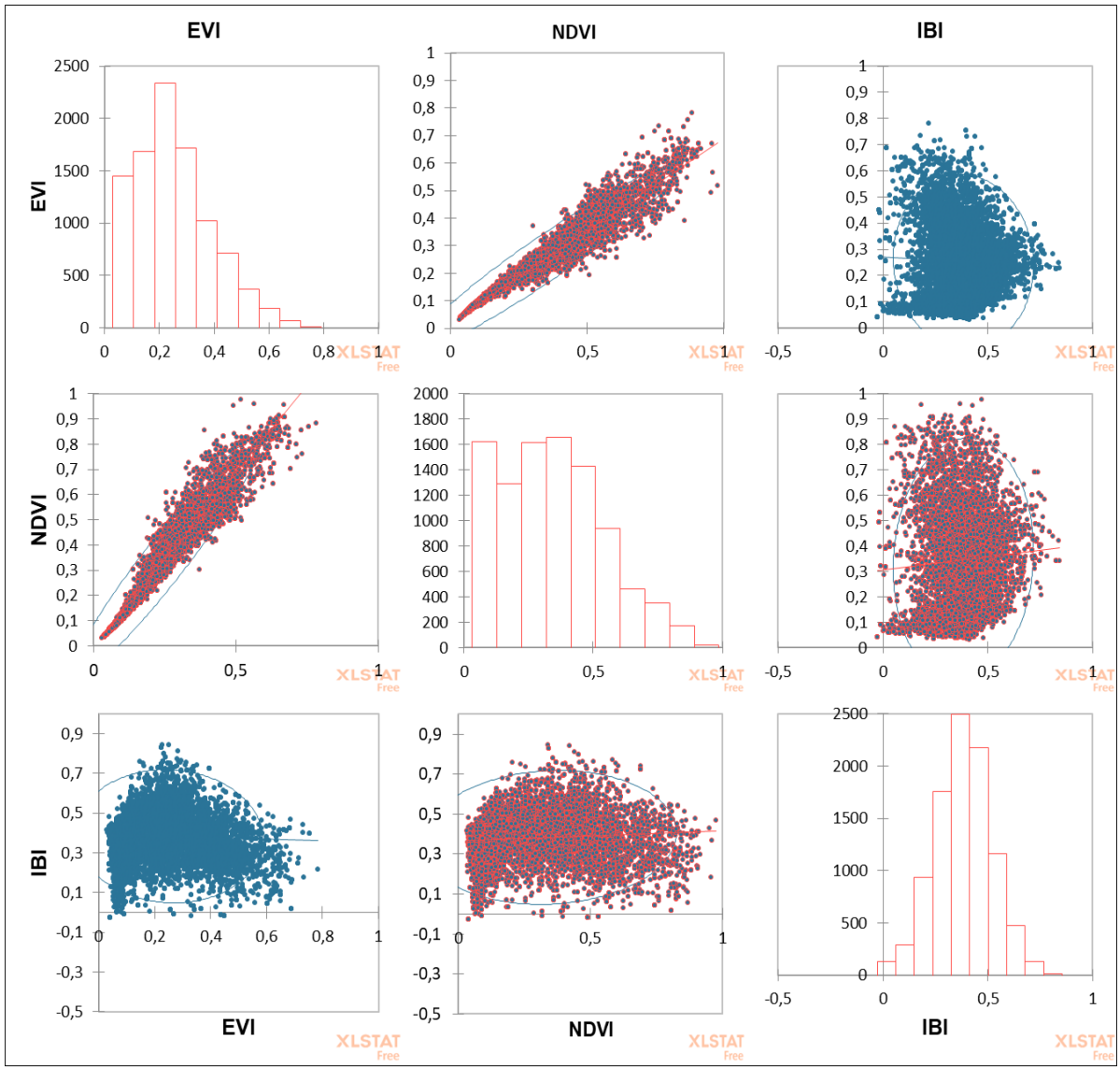


Figura 21. Asociaciones entre los índices espectrales medidos en diferentes usos de suelo presentes en el ecosistema que contienen manantiales de la empresa Smart Alliance, La Maná, Cotopaxi. IBI: índice de urbanización; EVI: índice de vegetación mejorado; NDVI: índice de vegetación normalizada.

creative commons
BY NC SA

Análisis de regresión lineal entre el IBI y la productividad de la vegetación

Se exploró la relación entre el Índice de Urbanización (IBI) y dos índices de vegetación, EVI y NDVI, a través de un modelo de regresión lineal. Se observó una tendencia negativa entre el IBI y ambos índices de vegetación, lo que sugiere que a medida que aumenta la urbanización, la cantidad de vegetación tiende a disminuir. Los modelos lineales ajustados confirman esta observación, mostrando pendientes negativas significativas ($p < 0.0001$ para EVI y $p < 0.001$ para NDVI). La dispersión de los puntos alrededor de las líneas de regresión indica que la relación no es perfecta y que otros factores podrían estar influyendo en la presencia de vegetación (Figura 22).

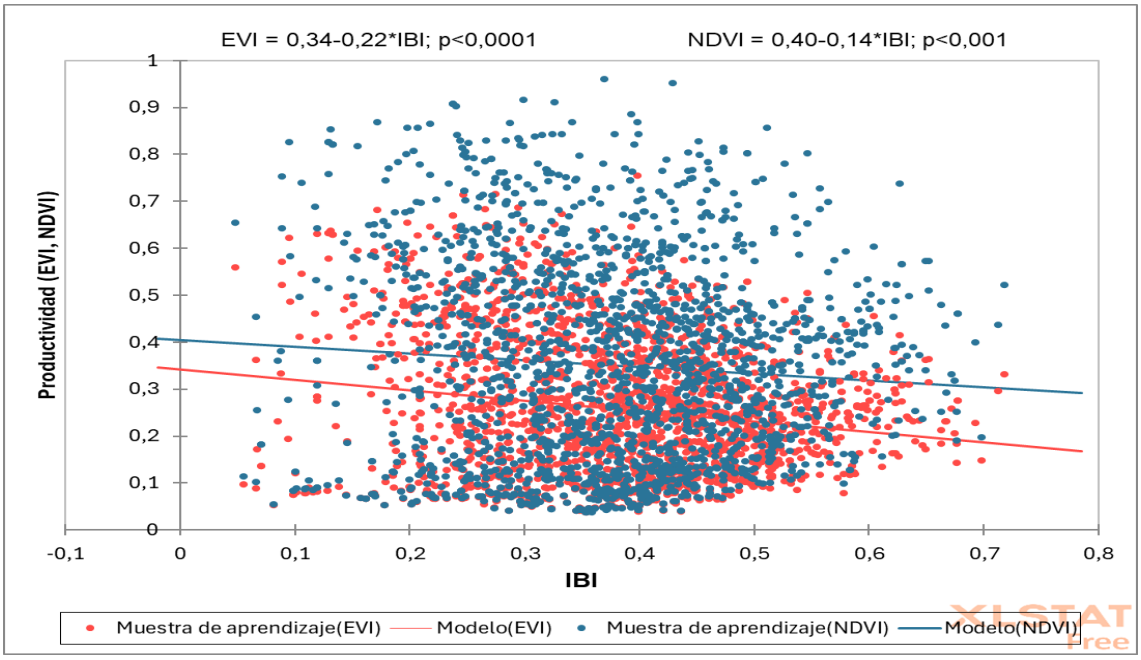


Figura 22. Modelo de regresión lineal que evidencia la influencia negativa del índice de urbanización sobre la productividad de la vegetación medida a través de los proxys índice de vegetación mejorado (EVI) e índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

Discusión

La identificación de cultivos agrícolas, bosques y minas como las principales actividades antropogénicas en el área de estudio proporcionan un argumento crucial para comprender los impactos en la vegetación del ecosistema. La variación temporal en la intensidad de estas actividades, con el año de mayor presión como 2024, sugiere una dinámica compleja de factores socioeconómicos y ambientales que modulan la interacción entre las actividades humanas y el ecosistema.

Según Perevochtchikova (2013), la antropización, entendida como la transformación de los ecosistemas naturales por la actividad humana, ejerce una presión significativa sobre la producción primaria de la vegetación a escala global. Este proceso abarca un amplio espectro de intervenciones, desde la alteración directa del uso del suelo hasta la emisión de contaminantes que modifican las condiciones ambientales.

La producción primaria de la vegetación, definida como la tasa en la cual las plantas convierten la energía solar en biomasa a través de la fotosíntesis, es un componente fundamental para la funcionalidad de los ecosistemas terrestres. Por eso, Martínez y Leyva (2014) indican que este proceso

sustenta la base de las cadenas tróficas, regula el ciclo del carbono y contribuye a la estabilidad climática local. Sin embargo, su eficiencia puede verse seriamente afectada por la antropización, La alteración de los paisajes naturales reduce la cobertura vegetal, fragmenta hábitats, introduce especies invasoras y modifica la disponibilidad de recursos esenciales como agua, luz solar y nutrientes, lo que afecta directamente la capacidad fotosintética de las plantas.

Uno de los sectores industriales con mayor impacto sobre la vegetación primaria es la minería, especialmente en su modalidad a cielo abierto. Esta actividad tuvo un aumento en la zona de estudio, lo que implica la remoción total de la cobertura vegetal y del suelo superficial, lo que elimina la capacidad fotosintética de las plantas en la zona intervenida, reduciendo la producción primaria neta (PPN) a cero en esos espacios. Además, la exposición del suelo a la erosión, su compactación por maquinaria pesada y la contaminación con metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As), afectan la salud del ecosistema al alterar los procesos fisiológicos de las especies vegetales remanentes o en regeneración (Oliveros et al., 2017). La presencia de estos elementos tóxicos inhibe la fotosíntesis, reduce la eficiencia en el uso del agua e interfiere con la síntesis de biomoléculas esenciales para el crecimiento vegetal (Rai et al., 2021).

En regiones tropicales como la Amazonía brasileña, la expansión de la minería ha resultado en una reducción de hasta el 30 % en la producción primaria de las áreas afectadas, comprometiendo tanto la biodiversidad como los servicios ecosistémicos locales (Sachs, 2021). De igual forma, en la zona

del río Tinto en España, estudios sobre fitorremediación han revelado que los suelos mineros muestran una capacidad productiva considerablemente más baja en comparación con áreas de control, debido a la toxicidad residual del sustrato (Martínez & Leyva, 2014).

En los Andes de países como Ecuador, Perú y Colombia, la minería ha provocado severas pérdidas de cobertura vegetal en bosques montanos y ecosistemas de páramo, los cuales son vitales para la captación de agua y la regulación climática. Estas alteraciones también se traducen en una menor producción primaria, afectando negativamente la resiliencia de los ecosistemas (Flynn et al., 2019). A nivel del suelo, la pérdida de materia orgánica y microorganismos beneficiosos impide la regeneración natural, haciendo necesario el uso de técnicas de restauración ecológica que incluyan especies nativas tolerantes a contaminantes, enmiendas orgánicas y estrategias de revegetación progresiva (Caiza 2022).

Frente a estos desafíos, el monitoreo de la producción primaria mediante herramientas como la teledetección satelital (índices NDVI, EVI) permite evaluar el estado funcional de la vegetación en tiempo real y verificar el éxito de los programas de restauración. Estos indicadores no solo miden la densidad de la vegetación, sino también su vigor fotosintético, sirviendo como base para la toma de decisiones en gestión ambiental. La recuperación de la producción primaria en áreas antropizadas requiere un enfoque integral que combine la remediación del suelo, la revegetación con especies adaptadas y el seguimiento continuo del desempeño ecológico de las intervenciones (Burbano et al., 2015).

Por este motivo Arasa et al. (2021) indican que el impacto de la deforestación y la urbanización de ecosistemas con manantiales en el estado de Puebla, comprometieron la salud de los manantiales incrementando la vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos extremos. En concordancia con los resultados del presente estudio, Arasa et al. (2021) sugieren una influencia negativa de la pérdida de cobertura vegetal sobre la productividad del ecosistema.

Por otra parte, Arévalo (2012) indica que la expansión de monocultivos en zonas cercanas a manantiales afecta la estructura de la vegetación y la calidad del suelo, encontrando que la agricultura intensiva reduce la diversidad de especies y aumenta la compactación del suelo, disminuyendo la capacidad de infiltración de agua y afectando a los manantiales. Este resultado no concuerda con lo obtenido en el presente estudio, donde no se lograron identificar diferencias entre la productividad de los bosques y zonas de cultivos. Esta controversia señala la necesidad de que futuras investigaciones pueden explorar estos factores con mayor detalle, incluyendo análisis de políticas de uso de suelo, dinámicas de mercado y eventos climáticos.

La descripción de los cambios espaciotemporales en la vegetación del ecosistema, basada en el análisis de índices de vegetación, revela patrones de disminución de la productividad en áreas con mayor presión antropogénica, lo cual coincide con el estudio de Alatorre et al. (2024). Estos autores señalan que la evolución temporal y espacial de la dinámica vegetal sobre varias coberturas de suelo, mostraron un incremento del índice de vegetación NDVI en marzo para las áreas vegetadas, mientras que las áreas

degradadas (cárcavas y zonas de riesgo de erosión) presentaron una tendencia negativa.

Sin embargo, Klimisch et al. (2022) indican que el NDVI resultó ser el índice con superior correlación revelando un comportamiento más uniforme respecto de la vegetación, en relación a los atributos del NDVI, el Complejo Andino y Estepa Magallánica Húmeda, presentaron en octubre, un comportamiento bimodal (octubre y abril) y las demás áreas no presentaron patrones claros. Esta relación inversa subraya la necesidad de comprender los mecanismos específicos a través de los cuales las actividades humanas impactan la salud y vitalidad de la vegetación. Estudios a nivel de especies y comunidades vegetales podrían complementar este análisis, identificando respuestas diferenciales a la antropización y vulnerabilidades específicas.

Se demuestra también que el uso de índices espectrales, como el IBI, permite extraer con buena precisión las superficies impermeables. En conjunto, estos hallazgos resaltan la necesidad urgente de implementar medidas de gestión sostenible que regulen las actividades humanas en el ecosistema, promoviendo prácticas agrícolas y forestales sostenibles, así como la restauración de áreas degradadas. La participación de la comunidad local en la toma de decisiones y el diseño de estrategias de conservación son esenciales para garantizar la sostenibilidad del ecosistema a largo plazo.

Esta investigación sienta las bases para futuros estudios que profundicen en la comprensión de la dinámica del ecosistema que contiene manantiales y su relación con las actividades humanas. Es importante considerar una ampliación del análisis temporal, integrar datos biofísicos y socioeconómicos,

y utilizar modelos de simulación para evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión. Solo a través de un enfoque multidisciplinario y colaborativo será posible abordar la problemática de la antropización y garantizar la conservación de este valioso ecosistema.

Conclusiones

Los hallazgos derivados de la caracterización de las actividades antropogénicas en el ecosistema indicaron cambios a favor del aumento de la minería de 3,40 km^2 a 11,04 km^2 entre 2019 y 2024. El área dedicada a infraestructuras aumentó en menor proporción. Estos cambios generaron el decrecimiento del área de vegetación nativa con una pérdida del 11,4 % de bosques.

La dinámica del índice mejorado de vegetación y el índice de vegetación de diferencia normalizada en el ecosistema revela la complejidad de las interacciones entre los cultivos y bosques, con mayor productividad primaria de la vegetación de enero a marzo (0,4), y valores más bajos de agosto a noviembre (0,2), en época de sequía.

El impacto de las actividades humanas en la productividad primaria de la vegetación es negativo, en la medida que aumentan las actividades antropogénicas disminuye la productividad de la vegetación. El 3% de la variación de la productividad de la vegetación estuvo asociada al incremento del índice de urbanización, lo que demuestra que hubo un decrecimiento de

la actividad fotosintética y densidad vegetal en el periodo, aumentando el cambio de uso de suelo a antropización.

Bibliografía

Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Analysis of the spatio-temporal evolution of NDVI in vegetated areas and erosion risk areas in the central Pyrenees. *Pirineos*, *165*, 7–27. https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001

Arasa, R., Arroyo, V., & Andresen, E. (2021). The debate about the effects of habitat fragmentation: causes and consequences. *Ecosistemas*, *30*(3). https://doi.org/10.7818/ECOS.2156

Arévalo, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. *Wwf*, 67.

Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la hidrología del Ecuador*. 6. https://doi.org/201402

Caiza, D. (2022). *Análisis del cambio del uso de suelo en a cuenca alta del río Guayllabamba*. https://doi.org/12440

Durán, F., Urpi, W., Enriquez, A., Valverde, J., & Cordero, R. (2023). *II encuentro de restauración ecológica en Costa Rica 2023*. https://doi.org/35202

Flynn, D. F. B., Gogol-Prokurat, M., Nogeire, T., Molinari, N., Richers, B. T.,

Lin, B. B., Simpson, N., Mayfield, M. M., & DeClerck, F. (2019). Loss of functional diversity under land use intensification across multiple taxa. *Ecology Letters*, *12*(1), 22–33. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01255.x

Hughes, J. (2013). Food and Agriculture. In *Environmental Management in Organizations: The IEMA Handbook, Second Edition*. https://doi.org/10.4324/9780203597675-13

Jung, M. S., Da Silva, J. A. G., Fachinetto, J. M., Copetti, C. M., Babeski, C. M., & Peter, C. L. (2024). Water springs: an immeasurable resource for ensuring sustainability. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, *96*(3). https://doi.org/10.1590/0001-3765202420231010

Klimisch, B., Maglione, D., Paredes, P., & Soto, J. (2022). Análisis del Comportamiento de la Vegetación a partir de Índices del Sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, *14*(3), 69–90. https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v14.n3.895

Koo, H., Kleemann, J., Cuenca, P., Noh, J. K., & Fürst, C. (2024). Implications of landscape changes for ecosystem services and biodiversity: A national assessment in Ecuador. *Ecosystem Services*, *69*(September 2023), 101652. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101652

Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, *35*(1), 11–20. https://doi.org/0258-5936

Ministerio de Ambiente. (2016). *Proyecto de control y erradicación de especies invasoras prioritarias para la reducción de la vulnerabilidad de especies endémicas y nativas de las islas Galápagos*. https://doi.org/201608

Ministerio del Ambiente, A. y transición ecológica. (2023). *Plan de acción Nacional para la conservación, restauración y uso de los páramos*. 6. https://doi.org/202311

Oliveros, D., Molina, I., Rodríguez, K., & Díaz, L. (2017). Caracterización y restauración ecológica de suelos en minería de carbón a cielo abierto: antecedentes, técnicas actuales y búsqueda de nuevas técnicas para su tratamiento. *Revista Agunkuyâa*, *7*(1), 36–49. https://doi.org/10.33132/27114260.1211

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la C. y la C. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. In *Unesco*.

Perevochtchikova, M. (2013). Environmental Impact Assessment and the Importance of Environmental Indicators. *Gestion y Politica Publica*, *22*(2), 283–312. https://doi.org/2013

Rai, S., Singh, P. K., Mankotia, S., Swain, J., & Satbhai, S. B. (2021). Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, *1*(March), 100008. https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008

Sachs, J. (2021). *Panel de Ciencia por la Amazonía Informe de evaluación de Amazonía 2021 PARTE III*. https://doi.org/10.55161/FXOQ8608

creative commons

BY NC SA