



Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón, usando herramientas SIG

Mónica Yadira Flórez Mojica

Sonia Yaneth Flórez Mojica

Carolina Polo Garzón

Sergio Andrés Valencia Cárdenas

David Felipe Ospina Alzate

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Seleccione Facultad UManizales
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Flórez Mojica et al., 2025)
Referencia	Flórez Mojica, M.Y., Flórez Mojica, S.Y., Polo Garzón, C., Valencia Cárdenas, S.A., Ospina Alzate, D.F. (2025). <i>Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón, usando herramientas SIG</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , II

Seleccione grupo de investigación UManizales (A-Z)

Seleccione línea de investigación UManizales (A-Z).

Seleccione centro de investigación UManizales (A-Z).

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema.....	11
1.1. Formulación del problema	11
1.2. Antecedentes	12
2 Justificación	22
3 Objetivos	24
3.1 Objetivo general	24
3.2 Objetivos específicos.....	24
4 Marco teórico	25
Teoría de la teledetección y reflectancia de la vegetación	25
Teoría del monitoreo ambiental y la dinámica de los ecosistemas	26
Fenología de la vegetación y análisis temporal del NDVI.....	26
Indicadores de Salud y Estado de la Vegetación.....	26
Aplicación del NDVI en estudios de Impacto Ambiental.....	26
Restauración Ecológica.	27
Cambio de cobertura vegetal.....	27
5 Metodología.....	28
5.1 Enfoque metodológico	28
5.2 Tipo de estudio	28
5.3 Procedimiento.....	29
5.3.1 Adquisición de los polígonos licenciados por la mina el Cerrejón para explotación minera.	29

	4
Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....	
5.3.2 Selección de imágenes satelitales.....	30
5.3.3 Recorte de imágenes al área licenciada por la mina.....	32
5.3.4 Cálculo del NDVI por año para el periodo de tiempo 2018-2024.	33
5.3.5 Clasificación y análisis de rangos NDVI.	33
5.3.6 Cálculo de proporciones para cada categoría.	34
5.3.7 Diferencias de NDVI.....	34
5.3.8 Clasificación de cambios en la cobertura vegetal.	34
5.3.9 Series temporales de NDVI.....	34
6 Resultados	36
Adquisición de los polígonos licenciados por la mina el Cerrejón para explotación minera. ...	36
Selección de imágenes satelitales y recorte al área licenciada por la mina.....	37
Cálculo del NDVI por año para el periodo de tiempo 2018-2024.	39
Clasificación y análisis de rangos NDVI.	39
Cálculo de proporciones para cada categoría	40
Diferencias de NDVI.....	42
Clasificación de cambios en la cobertura vegetal.	42
Series temporales de NDVI.....	43
7 Discusión.....	47
8 Conclusiones	49
9 Recomendaciones.....	50
Referencias	52
Anexos.....	58

Lista de tablas

Tabla 1: Configuración de bandas de Sentinel-2	31
Tabla 2: Umbrales específicos del NDVI	33
Tabla 3: Porcentaje de área licenciada para cada rango del NDVI por año.....	41
Tabla 4: Áreas en hectáreas equivalentes a los porcentajes	41
Tabla 5: Comparación resultados obtenidos vs informe de sostenibilidad	46

Lista de figuras

Figura 1: Captura de plataforma Datos Abiertos ANLA	30
Figura 2: Interfaz Google Earth Engine (GEE)	32
Figura 3: Polígonos licenciados para las actividades mineras	36
Figura 4: Polígono licenciado para las actividades mineras en El Cerrejón.....	37
Figura 5: Imagen satelital polígono licenciado 2018.....	38
Figura 6: Imagen satelital polígono licenciado 2019	38
Figura 7: Imagen satelital polígono licenciado 2020.....	38
Figura 8: Imagen satelital polígono licenciado 2021	38
Figura 9: Imagen satelital polígono licenciado 2022	38
Figura 10: Imagen satelital polígono licenciado 2023	38
Figura 11: Imagen satelital polígono licenciado 2024.....	39
Figura 12: NDVI 2018	39
Figura 13: NDVI 2019	39
Figura 14: NDVI 2020	40
Figura 15: NDVI 2021	40
Figura 16: NDVI 2022	40
Figura 17: NDVI 2023	40
Figura 18: NDVI 2024.....	40
Figura 19: Gráfica de áreas en hectáreas equivalentes a los porcentajes.....	42
Figura 20: Resultado Diferencias de NDVI 2018-2024	43
Figura 21: Serie temporal del índice NDVI en área de estudio	44

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

Figura 22: Líneas de tendencia de la serie temporal del NDVI.....46

Resumen

Se analizaron los cambios en la cobertura vegetal en el área licenciada para la mina de carbón El Cerrejón (La Guajira, Colombia) durante los años 2018 – 2024. Mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine (GEE) se aplicó el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a imágenes satelitales de Sentinel-2, estableciendo rangos que permitieron evaluar el estado de la vegetación en el área, indicando zonas afectadas por la actividad productiva y el avance en las medidas de restauración establecidas en el Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI). El análisis multitemporal evidenció un aumento de áreas con presencia de vegetación del 7.74% equivalente a 2755 Ha.

Esto resalta la importancia de tecnologías como la telemetría satelital y programas de SIG aplicados en este estudio para la gestión sostenible de los recursos naturales en proyectos mineros como El Cerrejón

Palabras clave: Imágenes satelitales, NDVI, SIG, explotación minera, Google Earth Engine.

Abstract

Changes in vegetation cover in the licensed area for the El Cerrejón coal mine (La Guajira, Colombia) during the years 2018–2024 were analyzed. Using the Google Earth Engine (GEE) platform, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was applied to satellite images from Sentinel-2, establishing ranges that allowed for the assessment of vegetation presence and plant wellness, showing zones affected by mining activity and the progress of restoration measures established in the Integrated Environmental Management Plan (PMAI). The multi-temporal analysis showed a 7.74% increase in areas with vegetation, equivalent to 2,755 hectares.

This highlights the importance of technologies such as satellite telemetry and GIS software, applied in this study, for the sustainable management of natural resources in mining projects such as El Cerrejón.

Keywords: Satellite images, NDVI, GIS, mining exploitation, Google Earth Engine

Introducción

El presente documento aborda el análisis de los cambios de la cobertura vegetal en el área licenciada para la explotación minera de El Cerrejón, un caso que ejemplifica la tensión entre el desarrollo económico y la conservación ambiental. Puesto que la expansión de esta actividad ha conllevado la degradación del uso del suelo, incluyendo la deforestación y la pérdida de vegetación.

La finalidad de este estudio es examinar los cambios de la cobertura vegetal producidos por la explotación minera en la región de El Cerrejón. En este sentido, se busca validar la efectividad de las acciones de restauración implementadas dentro del Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI) de la mina. Por consiguiente, el objetivo general de esta investigación es analizar los cambios en la cobertura vegetal entre 2018 y 2024 utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). De igual manera, se establecen como objetivos específicos identificar las áreas licenciadas para la minería, cuantificar los cambios en la cobertura vegetal a través del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y determinar el estado de la vegetación en la zona.

El planteamiento del problema se sintetiza en la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles han sido los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera del Cerrejón para el período de tiempo entre el 2018-2024? La justificación de este trabajo se fundamenta en la relevancia de analizar los impactos ambientales de la minería a cielo abierto, los cuales afectan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos cruciales para las comunidades. Teniendo en cuenta las limitaciones de los métodos de monitoreo tradicionales, este estudio se presenta como un recurso fundamental, ya que se vale de herramientas SIG para mapear, cuantificar y monitorear de manera precisa los cambios en la vegetación.

En síntesis, la novedad de esta investigación radica en el uso de imágenes satelitales procesadas en la plataforma Google Earth Engine (GEE), junto con el cálculo del índice NDVI, con el fin de evaluar de forma multitemporal la eficacia del componente de rehabilitación ambiental del PMAI. Este análisis proporciona evidencia científica sobre el grado de afectación de la minería, así como la efectividad de las prácticas de restauración y reforestación implementadas. En pocas palabras, los resultados pueden servir de base para la formulación de políticas públicas y para asegurar un monitoreo riguroso de los planes de reforestación.

1 Planteamiento del problema

1.1. Formulación del problema

El Cerrejón, es una de las minas de carbón más grandes del mundo, actualmente se encuentra bajo operación de la empresa Glencore, en su página oficial resalta que es una de las operaciones mineras de exportación de carbón a cielo abierto más grandes del mundo. De acuerdo con el Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI) y a la Agencia Nacional de Minería (ANM), cuenta con una extensión de área en 69.000 (Ha).

Desde los inicios de su operación hasta la actualidad, El Cerrejón se ha convertido en un caso emblemático que ilustra las tensiones entre el desarrollo económico y la conservación ambiental, debido a que, si bien se tienen importantes beneficios necesarios para el desarrollo económico de la población, la expansión de esta actividad ha llevado a una degradación del uso del suelo, afectando el entorno natural principalmente por la contaminación del agua y el aire, que han desmejorado significativamente desde el inicio de operación de la mina (Corpoguajira, 2019), y que se agudiza con la falta de regulación y control efectivo sobre las actividades mineras (Cerrejón, 2010).

El uso del suelo en la región ha experimentado cambios drásticos debido a la actividad minera, la deforestación y la pérdida de cobertura vegetal son consecuencias directas de la expansión de la minería, lo que ha llevado a la alteración de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad. Según estudios, la minería a cielo abierto consiste principalmente en el retiro de todas las capas del suelo para lograr llegar al yacimiento del carbón y lograr la extracción del mineral (Ulloa et al., 2021), lo que resulta en la destrucción de hábitats naturales, contaminación en los recursos naturales y la erosión del suelo.

El análisis de estos cambios en el uso del suelo y sus impactos requiere del estudio e implementación de herramientas que permitan una evaluación precisa y objetiva; en la actualidad el seguimiento ambiental es realizado por las autoridades ambientales, el cual consta de un proceso de dos fases, una primera fase documental y una segunda fase de inspección en campo; ambas presentan limitaciones tanto en tiempo como en recursos que dificultan una evaluación completa del área de influencia.

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

Una de las metodologías que se pueden implementar es a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales se presentan como una herramienta fundamental para el análisis espacial de los cambios del suelo y la identificación de áreas críticas afectadas por la minería. A través de la integración de datos geoespaciales, es posible visualizar y analizar la relación entre la actividad minera y sus efectos en el entorno.

La finalidad del presente estudio fue validar el avance de las acciones de manejo ambiental propuestas en el PMAI en los procesos de restauración, con la implementación de sistemas de información geográfica - SIG el cual permitió analizar el estado de la cobertura vegetal antes y durante a la explotación minera. De acuerdo con el informe de sostenibilidad del año 2023 la mina el cerrejón a través de los procesos de restauración alcanzó 200 hectáreas de rehabilitación de áreas, con una siembra de 500 mil árboles de bosque seco tropical en áreas destinadas para rehabilitar y conservar. (Cerrejón, 2023)

¿Cuáles han sido los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera del Cerrejón para el periodo de tiempo entre el 2018-2024?

1.2. Antecedentes

Existen estudios que utilizaron el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para analizar los cambios en la cobertura vegetal en diferentes contextos, especialmente en áreas afectadas por actividades humanas como la minería, la agricultura y la urbanización. Estudios enfocados en el monitoreo de la pérdida de vegetación, los patrones de recuperación ecológica y los impactos ambientales a largo plazo.

Wei et al., (2020) utilizaron el NDVI y datos satelitales de Landsat para evaluar el impacto de la minería en la cobertura vegetal durante un periodo de 20 años. El estudio evidenció una disminución significativa de NDVI en áreas mineras, indicando pérdida de vegetación. Los autores recomendaron prácticas de restauración ambiental y reforestación para mitigar estos efectos.

Dube & Mutanga, (2015) emplearon el NDVI en Sudáfrica para monitorear áreas mineras abandonadas y la regeneración de la cobertura vegetal con el tiempo. Utilizando imágenes de Landsat y Sentinel-2, los investigadores evaluaron la efectividad de la reforestación y la recuperación natural de la vegetación. Se encontró que algunas áreas mostraron incrementos en

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

NDVI tras medidas de restauración, otras no lograron una recuperación significativa, destacando la necesidad de una gestión adaptativa y el uso de especies autóctonas en los proyectos de reforestación.

Souza et al., (2005) aplicaron el NDVI en la región amazónica de Brasil, para medir los efectos de la deforestación causada por la expansión agrícola y ganadera. Estudios a gran escala utilizaron datos de MODIS y Landsat, cubriendo varios años para evaluar los cambios en la cobertura vegetal y la salud de la vegetación, La disminución del NDVI en áreas deforestadas evidenció pérdidas de vegetación a gran escala. Los datos NDVI se combinaron con técnicas de clasificación para identificar cambios de uso del suelo y áreas de bosque primario perdidas

Imhoff et al., (2000) analizaron cambios en la vegetación urbana en ciudades de Estados Unidos utilizando el NDVI y datos de alta resolución de satelital, aunque detectaron que las áreas urbanas tienen menor NDVI, también evidenciaron que los parques urbanos y las áreas verdes incrementan significativamente el índice, resaltando la importancia de mantener espacios verdes para la salud ambiental urbana.

Loma Pinto C, (2018) realizó un estudio que permitió evaluar los efectos de la minería de carbón en la cobertura vegetal en la región de El Cerrejón mediante imágenes Landsat y el cálculo del NDVI. Los resultados mostraron una disminución significativa en el índice de vegetación en áreas cercanas a las minas, indicando pérdida de vegetación nativa debido a la actividad minera.

Armenteras et al., (2013) realizaron un estudio en la Amazonía colombiana usando el NDVI para cuantificar los cambios en la cobertura vegetal. Identificaron que la deforestación estaba concentrada en áreas de expansión agrícola, y el NDVI mostró una reducción significativa en estas áreas afectadas.

Etter et al., (2006) evaluaron el impacto de la deforestación en los Andes colombianos mediante el NDVI y datos de Landsat. Sus resultados mostraron que la expansión agrícola y urbana ha causado una reducción en la cobertura vegetal, reflejada en los valores decrecientes del índice.

Poveda et al., (2011) analizaron la influencia del fenómeno del Niño en los Andes colombianos utilizando el NDVI como indicador de la evapotranspiración, los resultados indicaron que la región experimenta anomalías negativas (déficit) en la precipitación, caudales de ríos, humedad del suelo e índice NDVI, mientras que durante La Niña (fase fría) se presentan anomalías positivas (exceso). Siendo más fuertes y tempranas en la vertiente occidental de los Andes y más débiles y tardías en la vertiente oriental.

Poveda et al., (2002) realizaron un estudio en Colombia para determinar como el fenómeno de El niño afecta negativamente la humedad del suelo y el NDVI, Durante el fenómeno del Niño observaron déficits significativos de humedad en el suelo, especialmente en áreas de café al sol comparado con café bajo sombra o bosque, también identificaron anomalías de NDVI particularmente de septiembre a noviembre y junio a agosto durante eventos del fenómeno del Niño.

Ernesto Roldán Taborda et al., (2008) realizaron un estudio para analizar la variabilidad espacio-temporal del NDVI en Colombia y en la cuenca Amazónica durante el periodo 1981-2003, Concluyendo que el comportamiento del NDVI se relaciona con fenómenos climáticos a gran escala como ENSO y QBO.

Casamitjana et al., (2020) emplearon un vehículo aéreo no tripulado (UAV) con sensores multiespectrales (visibles, infrarrojo cercano) en Medellín Colombia para determinar la correlación de tres usos de la tierra agrícola (papa, suelo desnudo y pasto) con la humedad superficial del suelo. Se aplicaron cuatro índices de vegetación (el índice de sequía perpendicular, PDI; el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI; el índice de agua de diferencia normalizada, NDWI; y el índice de vegetación ajustado al suelo, SAVI) a imágenes de UAV y una resolución de 3 m para estimar la humedad superficial del suelo a través de la calibración con mediciones de campo in situ. Los resultados mostraron que, en suelo desnudo, los índices que mejor se ajustan a los resultados de humedad del suelo son el NDVI, el NDWI y el PDI a escala detallada, mientras que, en cultivos de papa, el NDWI es el índice que se correlaciona significativamente con la humedad del suelo, independientemente de la escala.

Ibrahim et al. (2020) evaluaron el potencial de los datos de Sentinel-2 para identificar áreas mineras y comprender la dinámica del cambio de cobertura del suelo en un área de estudio ubicada en el límite de los municipios de El Bagre y Zaragoza en el Bajo Cauca, Colombia. El estudio utiliza posprocesamiento de un conjunto de imágenes de 2016 a 2019. Los resultados muestran que la pérdida de vegetación debido a las actividades extractivas corresponde a alrededor del 35%, mientras que las áreas con vegetación recuperadas son el 7% del total de áreas excavadas en junio de 2019.

Vinasco et al., (2020) evaluaron los cambios en la superficie de la Ciénaga Grande, Santa Marta, Magdalena, Colombia, entre 2013 y 2018 se determinaron utilizando métodos de detección semiautomáticos con datos de alta resolución de sensores remotos (Landsat 8), La clasificación

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

semiautomática se realizó con una frecuencia anual, pero el monitoreo se realizó durante todo el período de análisis a través del desempeño de tres indicadores Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorada (EVI) e Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

Correa, (2020) aplicó cuatro índices de vegetación (RATIO, NDVI, NRVI, CTVI), para determinar las coberturas presentes en la parte media de la cuenca del río Combeima, empleando el proceso de clasificación supervisada de máxima verosimilitud en una imagen Pleiades de alta resolución espacial (0,5m). Los resultados demuestran que el uso de los cuatro índices de vegetación, como apoyo al proceso de clasificación supervisada, presentó mejores valores en los índices de calidad temática de la interpretación.

Correa, (2020) desarrolló una metodología apoyado en procesos semiautomáticos para detectar posibles movimientos de masa a escala regional. Se estudiaron cinco técnicas: morfometría, interferometría SAR (InSAR), InSAR con dispersor persistente (PS-InSAR), polarimetría SAR (PolSAR) y compuestos NDVI de Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8. El caso de estudio se eligió dentro del área medio-oriental del departamento del Cauca, que se caracteriza por su terreno montañoso y la presencia de inestabilidades de laderas, registradas oficialmente en el inventario de deslizamientos de tierra CGS- SIMMA. La teledetección óptica proporcionó compuestos NDVI derivados de la serie Landsat entre 2012 y 2016, mostrando que los valores de NDVI entre 0,40 y 0,70 tenían una alta correlación con los deslizamientos de tierra.

González et al., (2021) evaluaron la calidad de la vegetación del municipio de Chaguaní-Cundinamarca en Colombia durante el periodo 2013-2018, emplearon imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS, con el fin de extraer los valores del NDVI. En los resultados se identifican ascensos en el suelo desnudo desde 25.477 hectáreas hasta 50.270 hectáreas entre los años 2013 y 2014, esta situación se pone en un estado crítico el municipio de Chaguaní, ya que disminuye las zonas cultivables, afectando la seguridad alimentaria de la zona.

Perea Ardila et al., (2021) realizaron la caracterización espectral y monitoreo de 66,59 km² para cuatro densidades de BM en el Bajo Baudó (Colombia), empleando tres imágenes Landsat (1998, 2014 y 2017), combinaciones de bandas espectrales y tres índices de vegetación (IV) (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI, Índice de Vegetación Ajustado al Suelo - SAVI y el índice combinado de reconocimiento de manglares - RMC). Los resultados demostraron que la mejor combinación de bandas espectrales para la identificación visual de los BM correspondió

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

a color infrarrojo (NIR, Rojo, Verde) y color falso compuesto 1 (NIR, SWIR, Rojo). Esta investigación aporta a la caracterización y monitoreo espacial de BM con sensores remotos y el estudio espectral de este importante ecosistema en Colombia.

Millán et al., (2021) realizaron el proceso de construcción de capas cartográficas de los humedales costeros del Caribe colombiano a escala 1:100.000 y los resultados obtenidos en cuanto a su cuantificación y tipificación. Las capas se generaron mediante análisis multitemporal de 45 imágenes satelitales Landsat 8-OLI, con base en el índice NDVI, modelos de incertidumbre por superposición de atributos cartográficos y un modelo de consulta de frecuencia de inundaciones sobre imágenes, delimitaron 576.279 ha de humedales costeros (1,9 % del total de humedales de Colombia), de los cuales el 20,4 % se encuentran dentro de áreas protegidas.

Alarcón Montaña & Rozo Arango, (2021) analizaron la transformación del Bs-T en este municipio para los años 1991, 2015 y 2020, a través del cálculo de los NDWI y NDVI de imágenes satelitales Landsat, con el fin de determinar la evolución del vigor vegetal y la humedad del Bs-T. Los principales resultados muestran un aumento de las categorías de los índices bajo (entre $-0,6$ y $-0,1$) y muy bajo (desde -1 y $-0,61$) por lo que se concluye que existe una disminución y una compensación entre estos para ambas épocas (seca y lluviosa).

Tello-Cifuentes & Díaz-Paz, (2021) desarrollaron una metodología para el análisis de la contaminación ambiental en Medellín, usando técnicas de percepción remota, imágenes Landsat 7 y 8 y variables de calidad del aire, cálculo de los índices de temperatura de la superficie (TS), índice de vegetación normalizado (NDVI), índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI), índice de diferencia normalizada del agua (NDWI) y el índice normalizado del suelo (NSI), se obtuvo un mapa de calidad ambiental que permitió identificar que los focos de contaminación se presentan en sectores con poca cobertura de vegetación, gran cantidad de construcciones y gran flujo vehicular.

Milenys et al., (2022) desarrollaron un estudio para predecir eventos de sequía en el Magdalena, en el cual utilizaron avances en la resolución espacial y temporal de la teledetección combinados con técnicas de inteligencia artificial. Los autores desarrollaron modelos de aprendizaje automático basados en información histórica que incorporaron el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como variable clave para el análisis predictivo.

Suárez et al., (2022) exploraron el uso de técnicas de teledetección para la planificación de cultivos sostenibles en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), en zonas afectadas por la

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

deforestación causada por la expansión de cultivos ilícitos. Se utilizó cartografía digital e imágenes satelitales para identificar los lugares afectados con cultivos de coca, seguido de un análisis de la calidad de la vegetación mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los resultados revelaron que el rango del NDVI donde se encuentran los cultivos de coca está entre 0,36 y 0,5.

Preciado-Barragán & Sanabria-Buitrago, (2022) identificaron la variabilidad térmica en superficie con el fin de evidenciar si existe una variación entre dicha variación de la temperatura con factores tales como el crecimiento urbano y la concentración de cobertura vegetal, esto a través de un análisis espacial por medio de imágenes de satélite en el municipio de Zipaquirá. La metodología se basó en la comparación de la información meteorológica y poblacional disponible para Zipaquirá, con los patrones de cambio analizados con el índice de vegetación (NDVI), el índice de diferencia normalizada edificada (NDBI) y la temperatura superficial terrestre (TST), obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8.

Torres-Bejarano et al., (2023) utilizaron sistemas de teledetección e información geográfica para evaluar la influencia de las características de la cobertura terrestre en la calidad del agua del embalse El Guájaro, en el norte de Colombia. El estado de la cobertura terrestre en la cuenca del embalse El Guájaro se evaluó mediante el cálculo de los indicadores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) y la clasificación de la cobertura terrestre, utilizando imágenes de reflectancia superficial Landsat-8 obtenidas de la plataforma Google Earth Engine.

Núñez et al., (2023) evaluaron la vulnerabilidad socioeconómica con base en su nivel socioeconómico, nivel educativo, edad, densidad poblacional y porcentaje de población migrante. Evaluaron si esos grupos presentaban diferencias en la TST y otras variables relacionadas con la temperatura, incluyendo el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), el NDBI (índice de acumulación de diferencia normalizada) y la distancia al agua. Generaron un mapa de riesgo de calor basado en la vulnerabilidad socioeconómica y la exposición al calor.

Mejía Ávila et al., (2023) utilizaron imágenes multiescala, índices de vegetación y métricas del paisaje para modelar el CHA durante un período de 33 años. Se evaluaron tres condiciones hidrológicas: capacidad de almacenamiento permanente de agua, capacidad de amortiguación de inundaciones y pulso hidrológico. Se utilizaron imágenes de PlanetScope y RapidEye para comparar la eficiencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Mejorada (ENDVI), el

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

Índice Espectral de Vegetación Emergente (EVSÍ), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustada al Agua (WAVI), derivados de imágenes de Landsat Thematic Mapper (TM) y Operational Land Imager (OLI), para mapear el paisaje del CHA.

Mejía et al., (2023) estimaron la biomasa aérea y carbono mediante teledetección y herramientas de modelación matemática en bosques secos del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima: bosque de galería y ribereño (152,2 ha) y vegetación secundaria o de transición (329,1 ha). Se calcularon cuatro índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI y OSAVI) a partir de dos imágenes satelitales Sentinel 2A de la época lluviosa y seca. El índice NDVI de la época lluviosa mostró el mejor R^2 (0,87), lo que permitió el desarrollo de un modelo para la estimación de biomasa aérea.

Bolaños et al., (2023) muestra cómo predecir los rendimientos en las etapas tempranas del ciclo productivo del cafeto, como la floración, mediante el uso de imágenes aéreas. Se evaluaron descriptores físicos y espectrales como predictores para los modelos de predicción de rendimiento. Los resultados mostraron correlaciones entre los predictores seleccionados y 370 muestras de rendimiento de un cultivo de café Arábica colombiano. El volumen del cafeto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Maduración del Café (IRC) mostraron los valores más altos, con 71%, 55% y 63%, respectivamente.

Molina et al., (2024) muestra que se podrían ubicar fosas clandestinas utilizando datos multispectrales NDVI y NIR. Las implicaciones de la investigación sugieren el uso inicial de tecnología de teledetección con drones para identificar las posibles zonas de búsqueda, antes de realizar reconocimientos terrestres, estudios geofísicos y su interpretación, y antes de emplear métodos de investigación intrusivos para la detección de personas desaparecidas en Colombia.

Jaramillo et al., (2024) estudiaron mediante imágenes satelitales de la misión Landsat 8 y técnicas avanzadas de análisis de datos para investigar los patrones temporales y espaciales de la salud de la vegetación en la Ciénaga de Mallorquín, una laguna costera en el norte de Colombia. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se calculó a partir de los datos satelitales para cuantificar la biomasa de la vegetación y su salud. Los resultados muestran una disminución significativa en los valores del NDVI entre 2013 y 2018, seguida de una fase de recuperación entre 2018 y 2022. Sin embargo, los niveles del NDVI en 2022 se mantienen significativamente más bajos que los de 2013, lo que indica la necesidad de continuar los esfuerzos de conservación. Este

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

estudio demuestra el poder de la teledetección como herramienta para monitorear la dinámica de la vegetación e informar prácticas de gestión sostenible en ecosistemas costeros tropicales.

De acuerdo con Sacristán Romero Francisco, (2005), la Teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de progresos en el conocimiento de la naturaleza, aunque todavía no se ha logrado todo lo que de ella se esperaba debido a que se deben realizar perfeccionamientos en el nivel de resolución espacial, espectral y temporal de los datos. Además, es necesario un mayor rigor científico en la interpretación de los resultados obtenidos, tratando de no extraer conclusiones definitivas de los estudios medioambientales realizados mediante técnicas de Teledetección. Los modelos que se elaboran para interpretar los datos de teledetección, deberán tener como objetivo eliminar los efectos ocasionados por la variabilidad en las condiciones de captación, la distorsión provocada por la atmósfera, y la influencia de parámetros tales como la posición del Sol.

En Sanjurjo-Vílchez & Bendayán-Acosta, (2024), la dinámica fluvial se caracteriza por diversos fenómenos que ocurren a lo largo del cauce de un río, entre estos los procesos de erosión, sedimentación y movimiento lateral que afectan la vida de los ribereños asentados en las márgenes de los ríos de las regiones tropicales. En este estudio evaluamos los índices de erosión, sedimentación y migración lateral del canal principal en tres sectores de la cuenca media del río Amazonas en la Amazonía peruana. Los resultados muestran una gran vulnerabilidad a la erosión y migración lateral en el sector “Samaria” y en parte del sector “Iquitos”. El sector “Muyuy” en el margen izquierdo presenta un escenario de probable avulsión o incursión del río Amazonas sobre el río Itaya. Los procesos analizados han sido interpretados e ilustrados mediante el uso de procedimientos y técnicas proporcionadas por la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica.

Para Hernández Lozano & Pavón, (2024) la sobreexplotación de los cuerpos de agua aunado a las sequías y el impacto del cambio climático reducen el agua disponible para actividades humanas, lo cual genera serios problemas económicos y sociales. Por tanto, una tarea imprescindible es el monitoreo del estado de los cuerpos de agua superficiales, y una alternativa rápida, precisa y económica es hacerlo mediante técnicas de teledetección usando sensores remotos satelitales. Estas técnicas ayudan a obtener información a distancia de un objeto determinado situado sobre la superficie terrestre. El objetivo de este estudio fue, mediante el método PRISMA, realizar una revisión de las aplicaciones de los sensores remotos en el monitoreo de cuerpos de agua para dar alternativas de uso de los índices de agua. El índice de agua modificado de diferencia

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

normalizada (MNDWI, por sus siglas en inglés) y el índice de extracción de agua automatizado (AWEI, por sus siglas en inglés) son los más adecuados debido a que son fáciles de construir e interpretar, además de que tienen alta precisión.

Según Díaz Giraldo et al., (2024) la evaluación de la Producción Primaria Neta Aérea (PPNA), medida como la cantidad de materia seca (MS) acumulada por las plantas en la biomasa aérea, es fundamental para las decisiones de manejo en sistemas de producción bovina basados en pasturas. Este estudio tuvo como objetivo comparar dos modelos para estimar la PPNA usando datos recopilados usando sensores remotos: uno empírico usando la regresión lineal (MERL) entre índices de vegetación y biomasa vegetal y otro semi-empírico, basado en la eficiencia del uso de la radiación por parte de las plantas (VPM). Se monitorearon 14 potreros de *Urochloa humidicola* CIAT 6133 cultivar 'Llanero' (de 3.1 ha cada uno) manejados bajo pastoreo, con 30 días de descanso. La información espectral se obtiene de un sensor Sentinel 2 integrado para calcular los índices Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y el Índice de Agua de la Superficie Terrestre (LSWI). Los datos de radiación global se obtuvieron de una estación meteorológica de campo. El mejor índice fue el NDVI con un R², error cuadrático medio (RMSE) y error relativo de predicción (RE, %) de 0.68, 99.5 y 16.42 para MERL, y de 0.79, 103.62 y 17.16 para VPM, respectivamente. Los modelos MERL y VPM demostraron ser herramientas potencialmente útiles para la estimación de PPNA a partir de imágenes Sentinel 2A.

De acuerdo con Aramayo et al., (2024) la erosión hídrica es una de las principales causas de degradación de tierras. Las estimaciones de erosión son fundamentales para la optimización de estrategias de conservación de suelos. Por eso estudiamos la susceptibilidad a la erosión hídrica y sus factores predisponentes en una cuenca de la región árida de la Patagonia norte, con el modelo USLE (siglas en inglés para Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Empleamos herramientas de teledetección, SIG y análisis de componentes principales para evaluar el escenario promedio de pérdida de suelo. Además, evaluamos los cambios en la erosión estimada bajo tres escenarios posibles de acuerdo a modificaciones en la cobertura y la intervención sobre los humedales. La tasa estimada de pérdida de suelo por erosión hídrica promedió 27 t ha⁻¹ año⁻¹ con distintos grados de afectación en el área. Estos resultados fueron convergentes con la cantidad de sedimentos en suspensión recolectados en tres arroyos de la cuenca. El factor que depende de la pendiente del terreno fue el que mostró el mayor control sobre la variabilidad de la erosión hídrica. Entre los

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

escenarios planteados, las mayores diferencias con respecto a la situación promedio correspondieron a cambios en la erosividad en las precipitaciones más que a cambios en la cobertura o intervenciones en mallines. La extensión espacial del análisis fue posible gracias a la combinación de las herramientas empleadas y brinda un contexto acorde a la complejidad de los procesos ecológicos. Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la existencia de áreas sensibles a la erosión hídrica y permiten establecer prioridades y/o alcances de las decisiones para el cuidado de los recursos naturales en zonas áridas como esta porción de la Patagonia.

Estos estudios demuestran la versatilidad del NDVI aplicando imágenes satelitales para evaluar la cobertura vegetal en diversas condiciones ambientales y actividades humanas. En contextos de minería, como en El Cerrejón, el NDVI permite detectar la pérdida de vegetación y evaluar los resultados de prácticas de recuperación, siendo una herramienta fundamental para medir impactos y gestionar estrategias de restauración ambiental.

2 Justificación

La explotación minera a cielo abierto ha generado impactos significativos en el medio ambiente, especialmente en la cobertura vegetal. Este recurso natural no solo representa un componente esencial para la biodiversidad local, sino que también contribuye a la regulación climática y la calidad del agua, brinda servicios ecosistémicos cruciales para las comunidades cercanas.

Analizar los cambios en la cobertura vegetal mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es fundamental por varias razones, permiten mapear, cuantificar y monitorear los cambios en la vegetación de forma precisa. La novedad de este estudio radica en el uso de imágenes satelitales gratuitas procesadas en Google Earth Engine (GEE) junto con el cálculo del índice NDVI para evaluar de forma multitemporal la aplicación del componente de rehabilitación del Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI) en áreas deforestadas por la actividad minera. Este análisis proporciona evidencia científica sobre el grado de afectación que la minería tiene sobre los recursos naturales y la biodiversidad, así como sobre la efectividad de las prácticas de restauración y reforestación implementadas por la empresa minera. El estudio no solo se limita a identificar los cambios negativos, sino que también resalta las acciones positivas derivadas del Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI), lo que contribuye a un entendimiento más completo de la dinámica de la vegetación en áreas mineras.

Es fundamental establecer políticas públicas que aseguren un monitoreo riguroso de los planes de reforestación en zonas mineras. Fomentar prácticas sostenibles y responsables dentro del sector minero resulta esencial para garantizar la efectividad de las iniciativas de rehabilitación y conservación a largo plazo. Los resultados de este estudio pueden ofrecer una base para la formulación e implementación de dichas políticas, destacando la importancia de un marco normativo que impulse acciones concretas en favor de la restauración de los ecosistemas impactados por la actividad minera. Adicionalmente, los resultados pueden servir de instrumento para realizar el seguimiento ambiental al componente biótico, específicamente al programa de rehabilitación de áreas, dado que se ofrece información específica de áreas con cobertura vegetal y el estado de la misma, vegetación sana, en estrés, degradada o ausente.

Según lo expuesto por la autoridad nacional de licencias ambientales -ANLA- en el auto No 05757 de junio 2020, durante el seguimiento ambiental los evaluadores evidenciaron que se

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

debían adelantar actividades de resiembra en dos áreas de la mina El cerrejón cuyas actividades de rehabilitación iniciaron en el año 2016 y 2018, así como iniciar de forma inmediata con las actividades en otras áreas destinadas a la rehabilitación, áreas que durante el seguimiento realizado se encontraron sin avance en la implementación de las medidas, así mismo la autoridad ambiental menciona en el mismo auto que el plan de rehabilitación debe estar proyectado a mediano plazo es decir entre 5 a 10 años, en razón de lo anterior se tomó como punto de partida del presente estudio el año 2018 dado que en ese año iniciaron con las actividades en una de las áreas, se consideró realizar el cálculo del NDVI para el periodo de tiempo entre el 2018 al 2024.

Además, este proceso brinda información base para la planeación y diseño de políticas de manejo sostenible del territorio, la información generada a través del análisis SIG es valiosa para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales, así como ayuda a asegurar el cumplimiento de regulaciones ambientales, tanto nacionales como internacionales, y a promover una gestión responsable de los recursos naturales.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera en El Cerrejón mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfico (SIG) en el intervalo de tiempo del 2018 – 2024.

3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las áreas licenciadas para las actividades de explotación minera.
2. Establecer los cambios en la cobertura vegetal mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI
3. Cuantificar los cambios y el estado en la cobertura vegetal en la zona de influencia de la mina.

4 Marco teórico

El presente trabajo se fundamenta en teorías de teledetección y monitoreo ambiental, el análisis de los cambios en la cobertura vegetal mediante el uso de tecnologías y la aplicación del índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) el cual permite evaluar la salud de la vegetación y los cambios en el uso del suelo, se presenta la revisión de los principales referentes teóricos

Teoría de la teledetección y reflectancia de la vegetación. La teledetección es la ciencia de obtener información sobre objetos o áreas desde una distancia mediante el uso de satélites o aeronaves, la reflectancia de la vegetación en diferentes bandas espectrales permite estimar la cantidad y el vigor de la vegetación, la vegetación sana absorbe gran parte de la luz roja y refleja considerablemente el infrarrojo cercano, lo que facilita la diferenciación de áreas con densa o escasa, El NDVI se calcula a partir de la diferencia entre las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y rojo (RED) de una imagen satelital, el índice oscila entre -1 y 1 donde valores positivos altos indican vegetación densa y saludable mientras que valores cercanos a cero o negativos indican suelos desnudos, cuerpos de agua o vegetación degradada (Im et al., 2009)

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

$$NDVI = ((NIR - RED) \div (NIR + RED))$$

Donde:

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

RED es la reflectancia en la banda del rojo.

Este índice fue propuesto por Rouse et al., (1974), siendo uno de los índices de vegetación más utilizados debido a su simplicidad y capacidad para diferenciar áreas con vegetación en imágenes satelitales, se basa en la teoría de que la vegetación vigorosa refleja más en el infrarrojo cercano y absorbe más en el rojo, permite detectar cambios en la cobertura vegetal al compararse en distintos periodos de tiempo, es útil en estudios de deforestación, expansión agrícola y

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

recuperación de ecosistemas entre otros, ya que ofrece una medición rápida y efectiva de la salud y cobertura de a vegetación.

Teoría del monitoreo ambiental y la dinámica de los ecosistemas. Enfatiza la necesidad de estudiar y registrar los cambios en los ecosistemas a lo largo del tiempo para comprender la dinámica de los procesos ecológicos. Para los ecosistemas terrestres, el monitoreo de la vegetación permite observar el impacto de factores naturales y antrópicos como la agricultura, deforestación, minería y cambio climático, el NDVI es una herramienta que permite detectar cambios a gran escala en la cobertura vegetal y analizar patrones de regeneración o degradación fundamentales para la planificación ambiental (Wu & Hobbs, 2002).

Fenología de la vegetación y análisis temporal del NDVI. Se refiere a los cambios estacionales en la vegetación, brotes, crecimiento, senescencia y caída de las hojas, los datos temporales de NDVI permiten estudiar los patrones fenológicos en diferentes tipos de vegetación y detectar alteraciones anormales en el ciclo ocasionados por factores como la actividad humana o el cambio climático, utilizando series temporales de NDVI es posible analizar la respuesta fenológica de la vegetación y detectar cambios en el patrón de crecimiento (Pettorelli et al., 2005)

Indicadores de Salud y Estado de la Vegetación. La teoría plantea que ciertos índices y medidas pueden ser utilizados para evaluar la salud de un ecosistema, en el caso de la vegetación el NDVI se ha validado como un indicador confiable de productividad primaria y biomasa, un NDVI elevado suele corresponder a ecosistemas saludables y con vegetación densa, mientras que los valores bajos o decrecientes pueden indicar áreas de degradación (Wang et al., 2021).

Aplicación del NDVI en estudios de Impacto Ambiental. Es una herramienta que permite establecer líneas de base de vegetación y monitorear cambios en los ecosistemas derivados de actividades humanas como minería, expansión agrícola o proyectos de infraestructura Su aplicación incluye la identificación de áreas degradadas, la evaluación de la efectividad de medidas de restauración y la cuantificación de pérdidas o ganancias de cobertura vegetal a lo largo del tiempo. en minería a cielo abierto, el NDVI detecta la pérdida de biomasa en zonas de explotación y la recuperación en áreas rehabilitadas, sirviendo como indicador científico para auditorías ambientales. Además, su integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita la

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

generación de mapas temáticos que apoyan la toma de decisiones en gestión territorial (Morales Sánchez, 2013)

Restauración Ecológica. La teoría de restauración ecológica se basa en la recuperación de ecosistemas degradados a sus condiciones naturales o a un estado funcional, El NDVI permite monitorear la regeneración de la vegetación en áreas restauradas y evaluar la efectividad de las estrategias de restauración (Mazlan et al., 2023).

Cambio de cobertura vegetal. El cambio en la cobertura vegetal se refiere a la modificación en la distribución y tipo de vegetación en un área específica, ya sea debido a procesos naturales como incendios, sequías, y crecimiento de especies, o a actividades humanas como agricultura, urbanización, deforestación y minería. Estos cambios pueden impactar significativamente los ecosistemas, afectando la biodiversidad, los ciclos de nutrientes y los servicios ecosistémicos (Lambin et al., 2001).

5 Metodología

En esta sección del documento se presenta la metodología que fue abordada para desarrollar el presente proyecto. Esta metodología integra la selección de imágenes satelitales, su procesamiento y la interpretación de los resultados para evaluar la salud y densidad de la vegetación y así poder analizar cómo ha sido la variación y el cambio en la cobertura vegetal.

5.1 Enfoque metodológico

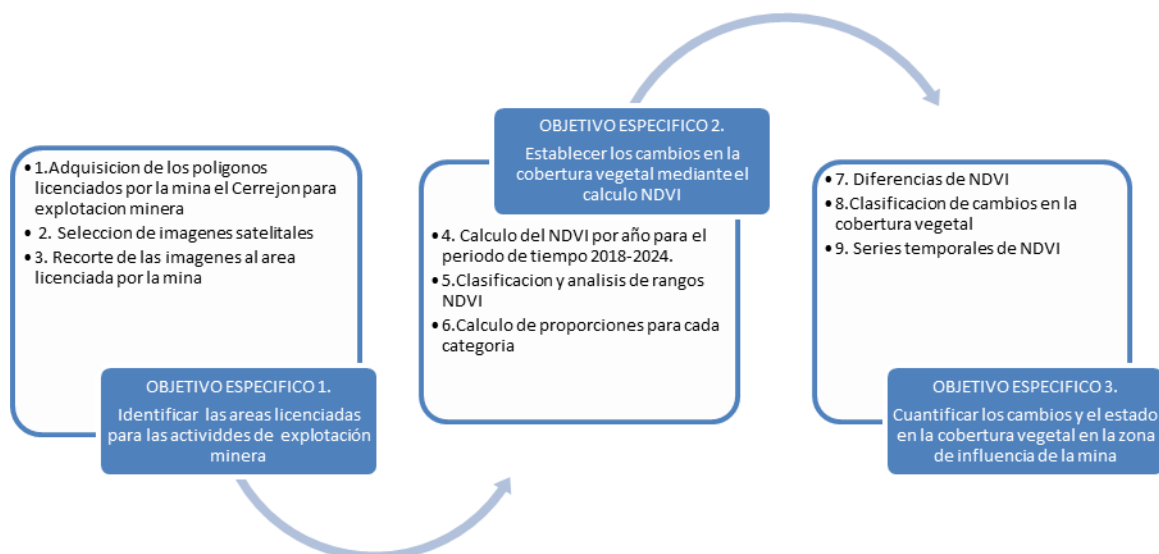
Se realizó un estudio con enfoque cuantitativo generando conocimiento sobre la realidad actual del cambio en las coberturas vegetales, se recopiló la información sobre las áreas licenciadas por la mina para delimitar el área de estudio y poder realizar un análisis con base en el procesamiento de imágenes satelitales para generar resultados medibles en objetivos que permitan comprender la situación actual en la zona de estudio en cuanto a la efectividad de las medidas de rehabilitación de áreas aplicada por la mina.

5.2 Tipo de estudio

Se realizó un estudio de tipo descriptivo, el fenómeno que se describe en este estudio es el cambio de la cobertura en el área de estudio, se procesó la información en software especializado ArcMap y en la plataforma Google Earth Engine las imágenes satelitales para obtener datos numéricos derivados del NDVI, mediante los cuales se podrá cuantificar la densidad y la salud de la vegetación.

5.3 Procedimiento

Diagrama de flujo 1. *Actividades realizadas por objetivo específico*

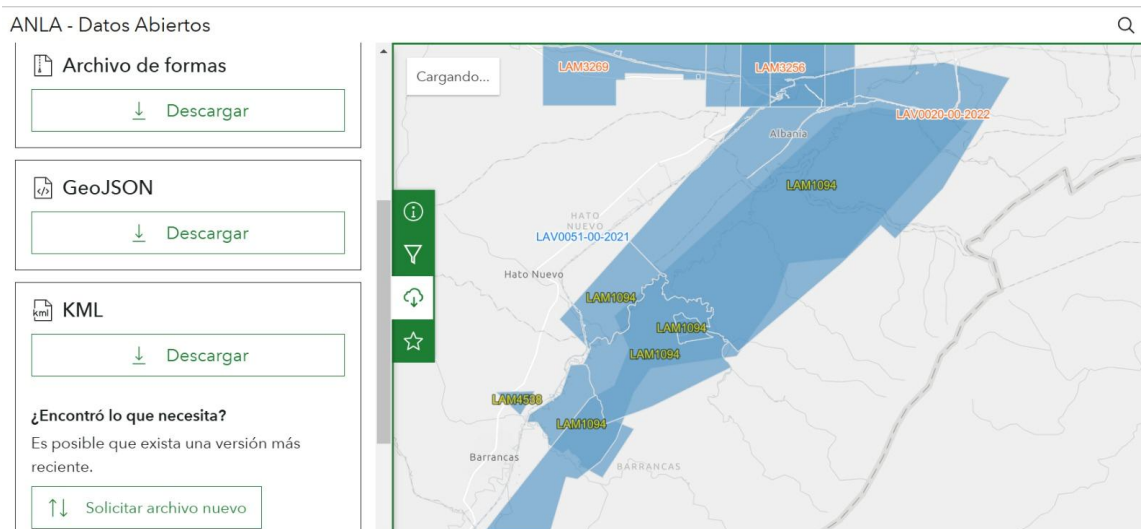


A continuación, se presentan las actividades realizadas de manera agrupada por cada objetivo específico con el fin de dar cumplimiento al objetivo general.

Para dar cumplimiento al objetivo específico 1 “Identificar las áreas licenciadas para las actividades de explotación minera” fueron ejecutadas las siguientes actividades:

5.3.1 *Adquisición de los polígonos licenciados por la mina el Cerrejón para explotación minera.*

Para obtener los polígonos licenciados de la explotación de la mina El Cerrejón, se identificó la fuente oficial de información licenciada, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA); se realizó la consulta en la plataforma geoespacial de ANLA, datos abiertos, donde se localizaron los polígonos asociados al expediente de la licencia ambiental de la mina y fueron descargados en formato Shapefile (.shp), compatible con sistemas de información geográfica (SIG); posteriormente, se incorporaron en ArcGIS para la visualización y su consolidación en un solo polígono.

Figura 1: Captura de plataforma Datos Abiertos ANLA

Nota. Fuente. (ANLA, s.f.)

5.3.2 Selección de imágenes satelitales.

Para la selección de las imágenes se tuvo en cuenta que debían proceder de un sensor con las bandas adecuadas (longitud de onda y rango) para ser compatible para la aplicación de los procesamientos, contener las bandas específicas y resolución espacial adecuada, para este estudio imágenes provenientes de Sentinel-2, dado que según Wulder et al., (2019), tienen resolución espacial y temporal que permiten detectar cambios en la vegetación y que al momento de ser descargadas presenta baja nubosidad para la zona de estudio del presente proyecto.

Para la aplicación del NDVI se requiere que las imágenes satelitales tengan las bandas NIR (Infrarrojo Cercano) longitudes de onda generalmente entre 0.7 y 1.1 μm . y RED (Rojo) longitudes de onda generalmente entre 0,6 y 0,7 μm (Wulder et al., 2019).

Tabla 1: Configuración de bandas de Sentinel-2

Numero de Banda	Función	Longitud de Onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol Costero	443	27	60
2	Azul	490	98	10
3	Verde	560	45	10
4	Roja	665	38	10
5	Vegetación borde rojo	705	19	20
6	Vegetación borde rojo	740	18	20
7	Vegetación borde rojo	783	28	20
8	Infrarrojo cercano (NIR)	842	145	10
8a	Vegetación borde rojo	865	33	20
9	Vapor de agua	945	26	60
10	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1380	75	60
11	SWIR	1610	143	20
12	SWIR	2190	242	20

Fuente. (Pasqualotto et al., 2020)

La selección de imágenes satelitales se realizó en la plataforma Google Earth Engine, se codificó para que procesara todas las imágenes Sentinel 2 Nivel -2A disponibles en un mismo año utilizando un filtro temporal para así generar un mosaico anual, el cual se genera combinando múltiples imágenes satelitales capturadas para reducir la nubosidad y mejorar la calidad visual.

Este proceso se conoce como selección de imagen óptima o composición de imágenes, utiliza la mediana para el procesamiento de la imagen con criterios de lanzamiento, estado de operación y resolución espacial esta última característica de selección incluye la baja o nula presencia de nubes.

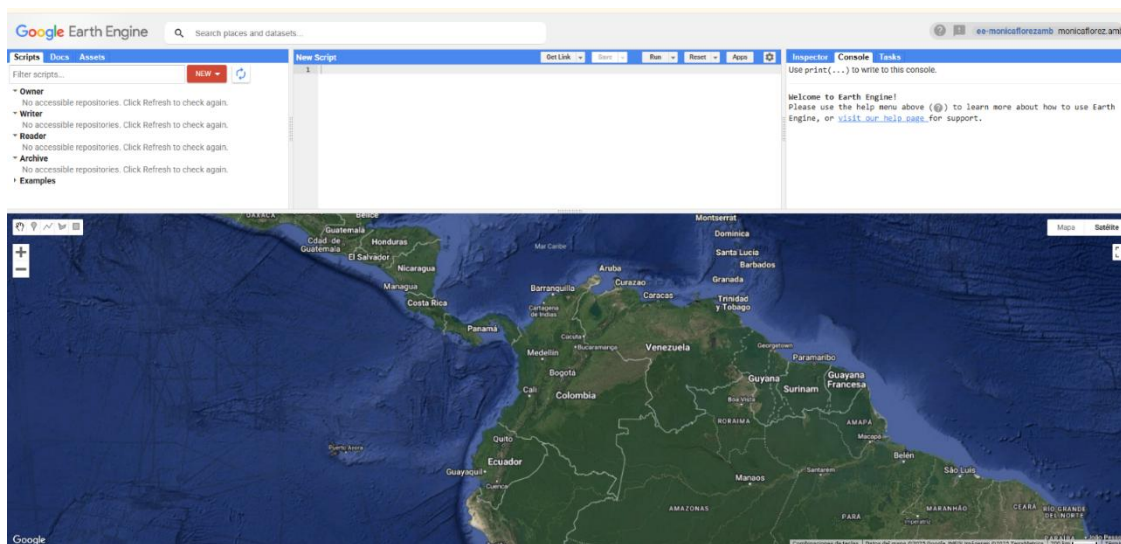
Se tomó como referencia un estudio, que definió el 2021 como período de estudio y como metodología empleó la generación de una imagen compuesta por la mediana a partir de todas las imágenes de Sentinel-2 nivel 2A capturadas en 2021. Los autores afirman, “Aplicar la mediana a las imágenes es lo más apropiado debido a su capacidad para ignorar los valores atípicos de reflectancia y su salida más suave en comparación con otros métodos de composición” (Moraiti et

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

al., 2024). En el caso del estudio de referencia, se consideró el lapso de un año como periodo para capturar la dinámica temporal representativa de los árboles de cacao, con una calidad aceptable, teniendo en cuenta que el área de estudio era susceptible a alta cobertura de nubes.

En el Anexo A, se presentan las líneas de código utilizadas en GEE para realizar la composición de la imagen por año y el recorte al área licenciada para las actividades mineras.

Figura 2: *Interfaz Google Earth Engine (GEE)*



Nota. Fuente. (Google, s.f.)

5.3.3 Recorte de imágenes al área licenciada por la mina.

Una vez obtenidas las imágenes satelitales se realizó el recorte en la plataforma Google Earth Engine, para limitar las imágenes satelitales al área licenciada para las actividades mineras, se realizó mediante la aplicación de la herramienta clip la cual se utiliza para delimitar la imagen a un área específica definida por un polígono o geometría.

Para dar cumplimiento al objetivo específico 2 “Establecer los cambios en la cobertura vegetal mediante el índice De Vegetación De Diferencia Normalizada - NDVI.” fueron ejecutadas las siguientes actividades:

5.3.4 Cálculo del NDVI por año para el periodo de tiempo 2018-2024.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fue calculado para cada una de las imágenes satelitales de cada año utilizando la ecuación desarrollada por Tucker en 1979: (Nasa & Casi, 1978).

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

Donde:

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

RED es la reflectancia en la banda del rojo.

El cálculo se realizó para cada año de la ventana de tiempo definida 2018-2024, generando un mapa de NDVI para cada año los cuales reflejan la densidad y salud de la vegetación en cada momento.

5.3.5 Clasificación y análisis de rangos NDVI.

La clasificación es un proceso que consiste en dividir los valores continuos del NDVI en categorías o clases para facilitar su interpretación y análisis, permite identificar diferentes tipos de cobertura vegetal y su estado de salud de manera más clara.

El valor del NDVI varía entre -1 y 1, y son asignados unos rangos de acuerdo a sus valores, tal como se muestra en Tabla 2.

Tabla 2: Umbrales específicos del NDVI

RANGO	CRITERIOS
< 0	Agua u otros elementos no vegetales.
0 – 0,3	Zonas estériles con poca o ninguna cubierta vegetal
0,3 – 0,6	Zonas con escasa cobertura vegetal
0,6 – 0,9	Zonas con una cubierta vegetal densa y sana.
>0,9	Zonas con una cubierta vegetal muy densa, como las selvas tropicales.

Fuente: (Nasa & Casi, 1978)

5.3.6 Cálculo de proporciones para cada categoría.

El cálculo de proporciones para cada categoría del NDVI consistió en determinar el porcentaje de píxeles de cada rango para el área de estudio, analizando cuantitativamente la distribución espacial de la vegetación y su salud

$$\% \text{ por rango NDVI} = \frac{\text{área total} \times 100}{\text{área rango NDVI}} \quad (2)$$

Donde

área total: Es el área total de la zona de estudio

área rango NDVI: Es el área cubierta por un rango NDVI específico

Se generó como resultado el porcentaje por rangos de NDVI en el área de estudio, mostrando la distribución de los valores por cada año del 2018 al 2024.

Para dar cumplimiento al objetivo específico 3 “Cuantificar los cambios y el estado en la cobertura vegetal en la zona de influencia de la mina” Se ejecutaron las siguientes actividades:

5.3.7 Diferencias de NDVI.

Este análisis evaluó la variabilidad en la vegetación en el periodo del 2018 al 2024, se realizó calculando la diferencia entre el NDVI del año 2024 y el NDVI del año 2018, obteniendo como resultado tres categorías: valores negativos que obedecen a pérdidas de vegetación, valores positivos por ganancias de vegetación y valores en cero que indican a áreas sin cambios en la cobertura vegetal. (Coppin & Bauer, 1996).

5.3.8 Clasificación de cambios en la cobertura vegetal.

Una vez realizado el análisis de diferencias de NDVI se procedió a clasificar las áreas utilizando los umbrales específicos de NDVI para determinar las áreas con pérdida de vegetación, ganancia de vegetación o sin cambio significativo (Coppin & Bauer, 1996)

5.3.9 Series temporales de NDVI.

Es una secuencia de valores calculados en intervalos de tiempo regulares, para este estudio se realizó por año para el periodo del 2018 al 2024, lo que nos permitió visualizar la evolución del

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

índice a lo largo del tiempo y evaluar tendencias de degradación o regeneración de la vegetación (Lunetta et al., 2006).

6 Resultados

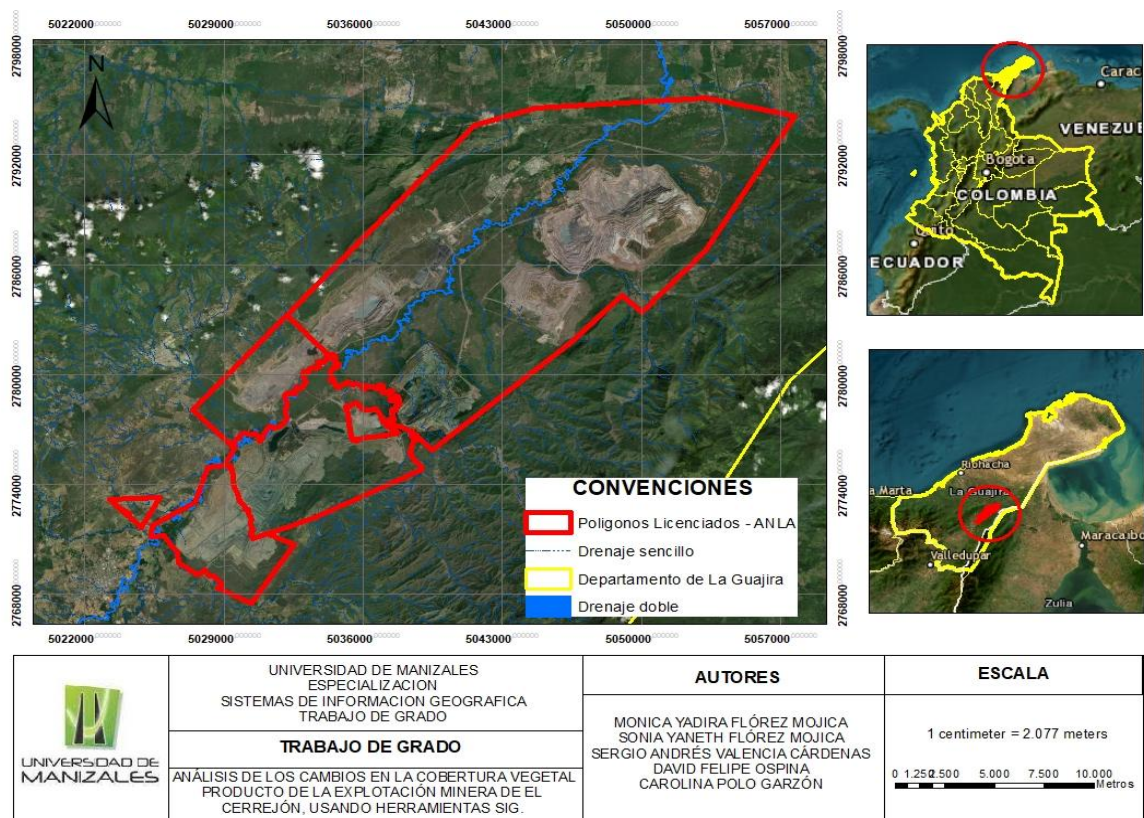
Para dar cumplimiento al objetivo general planteado en el proyecto, el cual se centra en obtener los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón, se llevaron a cabo diversas actividades, con el fin de cuantificar en términos de área los cambios en la cobertura del suelo y la expansión de las zonas intervenidas dentro de los polígonos licenciados para la actividad minera.

Resultados objetivo específico 1 “Identificar las áreas licenciadas para las actividades de explotación minera”

Adquisición de los polígonos licenciados por la mina el Cerrejón para explotación minera.

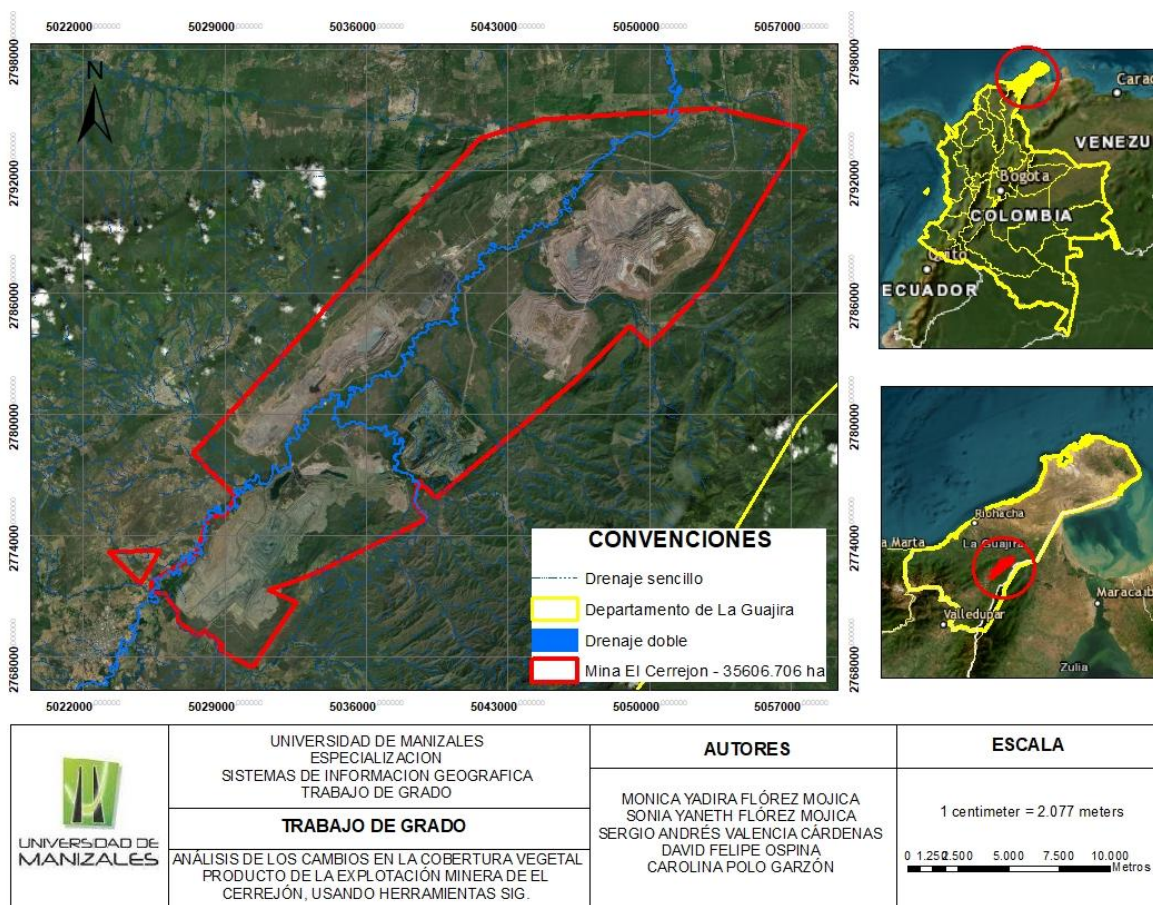
El expediente que corresponde a la licencia ambiental, la cual autoriza las actividades mineras, tiene seis polígonos en la plataforma de la ANLA (ver Figura 3).

Figura 3: Polígonos licenciados para las actividades mineras



Se realizó la descarga en formato Shapefile y se procedió a unirlos en el software especializado ArcMap para dejar un solo gran polígono (ver Figura 4) con un área total licenciada de 35606.706 ha.

Figura 4: Polígono licenciado para las actividades mineras en El Cerrejón



Selección de imágenes satelitales y recorte al área licenciada por la mina.

Las imágenes satelitales para los años 2018-2024 fueron recortadas a la zona de estudio utilizando el shapefile del polígono licenciado, estas imágenes son la base para calcular el NDVI, y se pueden observar en las Figura 5 a Figura 11.

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

Figura 5: *Imagen satelital polígono licenciado 2018*



Figura 6: *Imagen satelital polígono licenciado 2019*



Figura 7: *Imagen satelital polígono licenciado 2020*



Figura 8: *Imagen satelital polígono licenciado 2021*



Figura 9: *Imagen satelital polígono licenciado 2022*



Figura 10: *Imagen satelital polígono licenciado 2023*



Figura 11: Imagen satelital polígono licenciado 2024

Una vez fueron recortadas las imágenes a la zona de estudio, se procedió con la obtención de los resultados asociados al objetivo específico 2 “Establecer los cambios en la cobertura vegetal mediante el índice De Vegetación De Diferencia Normalizada - NDVI.”

Cálculo del NDVI por año para el periodo de tiempo 2018-2024.

Se obtuvieron siete imágenes en formato raster, una para cada año del periodo de estudio, a las que se les realizó el cálculo del NDVI en la plataforma Google Earth Engine.

Clasificación y análisis de rangos NDVI.

Se aplicaron los rangos del NDVI como se muestra en las figuras a continuación (Ver Figura 12 a la Figura 18), para cada año de la ventana de tiempo 2018-2024.

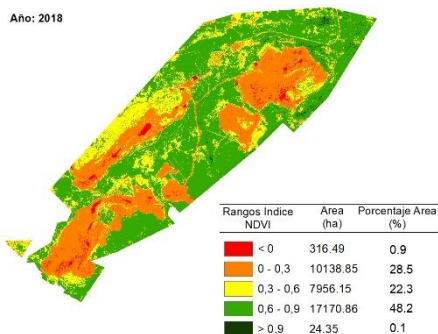
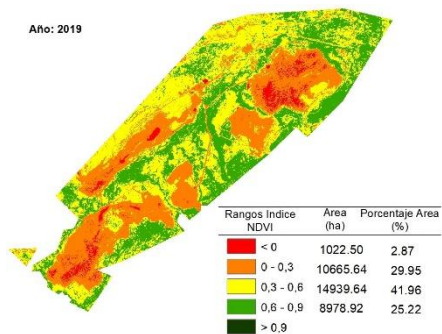
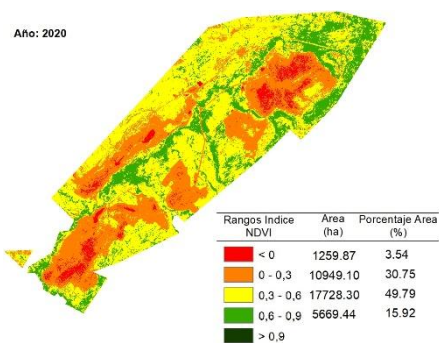
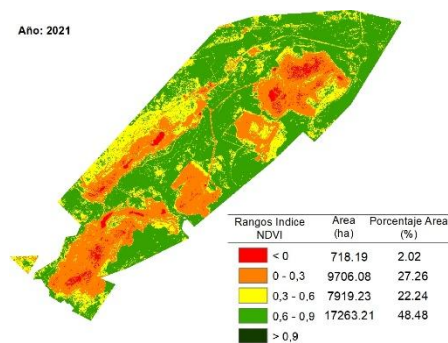
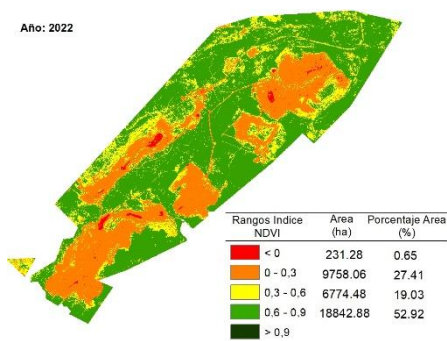
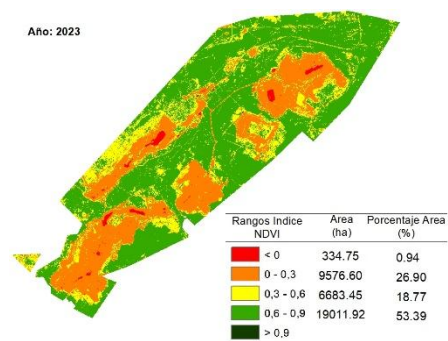
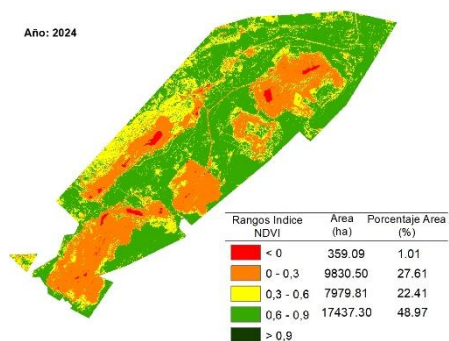
Figura 12: NDVI 2018**Figura 13: NDVI 2019**

Figura 14: NDVI 2020**Figura 15: NDVI 2021****Figura 16: NDVI 2022****Figura 17: NDVI 2023****Figura 18: NDVI 2024**

Cálculo de proporciones para cada categoría

Una vez obtenidas las imágenes ráster con la clasificación por rangos de NDVI se procedió a calcular el porcentaje de píxeles para cada rango del NDVI por año, la Tabla 3 permite visualizar la distribución porcentual del área licenciada para la mina en función de los rangos de NDVI para cada año comprendido entre 2018 y 2024, cada columna representa un rango de los valores.

Tabla 3: *Porcentaje de área licenciada para cada rango del NDVI por año*

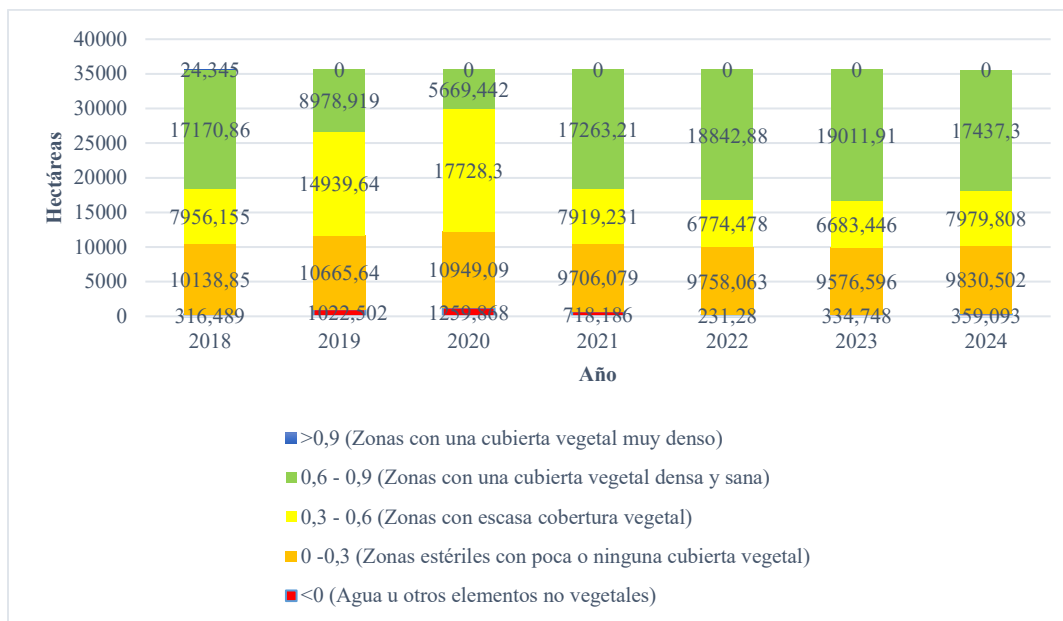
AÑO	< 0	0 - 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 0,9	> 0,9
2018	0,889	28,475	22,345	48,224	0,068
2019	2,872	29,954	41,957	25,217	0
2020	3,538	30,750	49,789	15,922	0
2021	2,017	27,259	22,241	48,483	0
2022	0,650	27,405	19,026	52,919	0
2023	0,940	26,895	18,770	53,394	0
2024	1,008	27,609	22,411	48,972	0

A partir de los porcentajes de píxeles en cada rango del NDVI fueron calculadas las áreas correspondientes en hectáreas (Ver Tabla 4).

Tabla 4: *Áreas en hectáreas equivalentes a los porcentajes*

AÑO	< 0	0 - 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 0,9	> 0,9
2018	316,489	10138,85	7956,155	17170,86	24,345
2019	1022,502	10665,64	14939,64	8978,919	0
2020	1259,868	10949,09	17728,30	5669,442	0
2021	718,186	9706,079	7919,231	17263,21	0
2022	231,280	9758,063	6774,478	18842,88	0
2023	334,748	9576,596	6683,446	19011,91	0
2024	359,093	9830,502	7979,808	17437,30	0

De manera gráfica en la Figura 19 se puede observar la distribución de las áreas en función de su cobertura vegetal dentro del área licenciada para las actividades mineras en El Cerrejón. La categorización en zonas con vegetación densa y sana, zonas con escasa cobertura vegetal y zonas con poca o ninguna cobertura vegetal, permite realizar un análisis en los cambios a lo largo del tiempo.

Figura 19: Gráfica de áreas en hectáreas equivalentes a los porcentajes

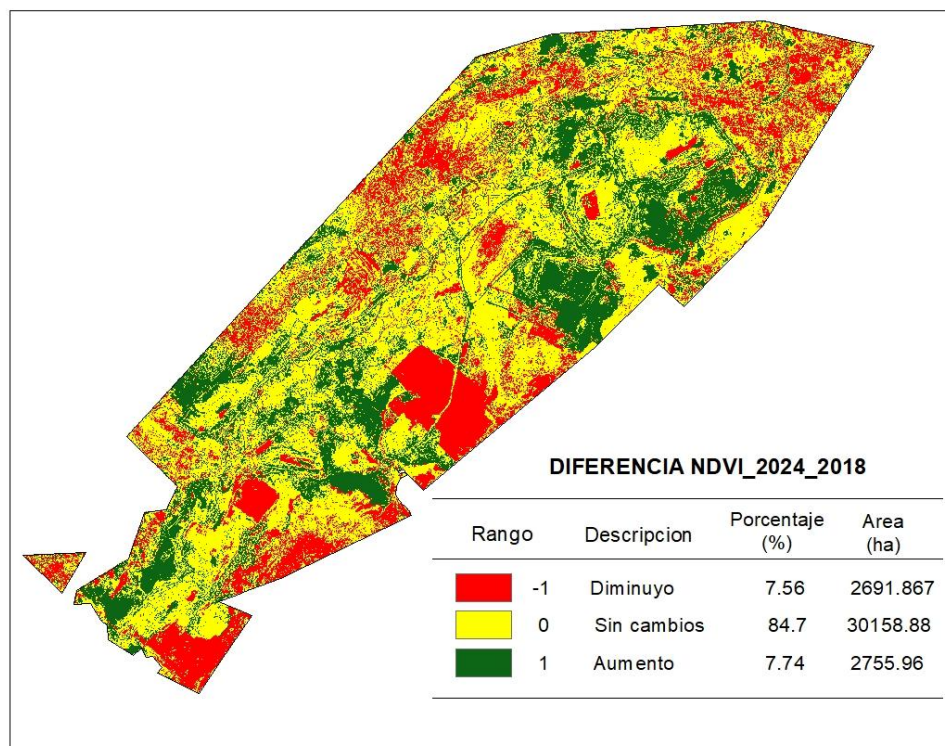
A partir del análisis temporal delo cambio de la cobertura fue posible obtener los resultados relacionados al objetivo específico 3 “Cuantificar los cambios y el estado en la cobertura vegetal en la zona de influencia de la mina”

Diferencias de NDVI.

En la Figura 20 son presentados los resultados del análisis de las diferencias del NDVI en el área licenciada para actividades mineras en El Cerrejón durante el período de 2018 a 2024. Esta figura es fundamental para entender los cambios en la cobertura vegetal en esta región a lo largo del tiempo, ofreciendo una representación visual de las variaciones que han ocurrido.

Clasificación de cambios en la cobertura vegetal.

Se muestran los porcentajes y áreas equivalentes donde se identifican por colores: pérdida de vegetación (rojo), con ganancia de vegetación (verde) y sin cambio significativo (amarillo). (Ver Figura 20).

Figura 20: Resultado Diferencias de NDVI 2018-2024

Series temporales de NDVI.

La Figura 21 muestra la evolución temporal del índice NDVI en el área de estudio, permitiendo evaluar los cambios en la cobertura vegetal entre 2018 y 2024. En el gráfico se distinguen cinco rangos de NDVI, que abarcan desde valores negativos (<0), correspondientes a cuerpos de agua u otros elementos no vegetales, hasta valores superiores a 0.9, los cuales indican la presencia de vegetación altamente densa.

Figura 21: Serie temporal del índice NDVI en área de estudio

Los resultados reflejan una reducción inicial en las áreas con vegetación densa (0.6 - 0.9) durante el periodo 2018-2020, alcanzando su nivel más bajo en 2020 con aproximadamente 5669.44 hectáreas, lo que sugiere un impacto significativo de la actividad minera. Sin embargo, a partir de ese punto, se observa un proceso de recuperación, con un incremento en la cobertura vegetal que alcanza su máximo en 2023 (19011.91 ha), lo que podría estar asociado a la implementación de estrategias de restauración ecológica o a la regeneración natural del ecosistema. Para 2024, se registra una leve disminución (17437.3 ha), posiblemente relacionada con variaciones estacionales o nuevas alteraciones en el entorno.

En contraste, las áreas con escasa vegetación (0.3 - 0.6) muestran una tendencia opuesta: entre 2018 y 2020, su extensión aumenta, llegando a 14939.64 ha en 2019, lo que evidencia un proceso de degradación de la cobertura vegetal. No obstante, a partir de 2021, esta categoría disminuye progresivamente, en concordancia con el incremento de la vegetación densa.

Las zonas consideradas estériles (0 - 0.3) han mantenido cierta estabilidad a lo largo del periodo analizado, con variaciones leves en su extensión. Esto sugiere que, aunque las acciones de

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

restauración han generado efectos positivos en algunos sectores, persisten áreas afectadas por la actividad minera.

Por otro lado, la categoría correspondiente a cuerpos de agua o elementos no vegetales (<0) ha experimentado fluctuaciones menores, con un leve incremento en 2019 y 2020, lo que podría estar relacionado con cambios estacionales o intervenciones humanas en la zona. En cuanto a la vegetación extremadamente densa (>0.9), su presencia en el área de estudio es prácticamente nula, lo que indica que la recuperación del ecosistema aún no ha alcanzado su máximo potencial.

Solo se trazan las líneas de tendencia de los índices 0,3 - 0,6 y 0,6 - 0,9 debido a que son los que mayor variabilidad presentan en el tiempo, los demás índices presentan una línea constante en el tiempo por lo que no se considera necesario el trazado de las líneas de tendencia de estos indicadores. La Figura 22 muestra las líneas de tendencia de la serie temporal del NDVI, destacando dos categorías clave: las áreas con escasa cobertura vegetal (0.3 - 0.6) y aquellas con una vegetación densa y saludable (0.6 - 0.9). El análisis de estas tendencias permite comprender la evolución de la cobertura vegetal en la zona de estudio entre los años 2018 y 2024, proporcionando información relevante sobre los efectos de la actividad minera y las estrategias implementadas para la restauración ambiental.

Se observa una relación inversa entre ambas categorías (zonas con escasa cobertura vegetal y zona con una cubierta vegetal densa y sana). En los primeros años del análisis, la extensión de las zonas con escasa cobertura vegetal (línea amarilla) experimenta un aumento, alcanzando su punto máximo en 2019 y 2020, lo que podría indicar una degradación del ecosistema asociada a la actividad minera. En contraste, las áreas con vegetación densa (línea verde) presentan una reducción en el mismo periodo, lo que soporta la hipótesis del impacto negativo de la explotación minera sobre la cobertura vegetal.

A partir de 2021, la tendencia se invierte: la superficie de zonas con vegetación densa muestra un crecimiento progresivo, mientras que las áreas con escasa cobertura vegetal comienzan a reducirse. Este cambio en la dinámica sugiere que las estrategias de restauración ecológica, la regeneración natural de la vegetación o la aplicación de planes de manejo ambiental han favorecido la recuperación del ecosistema.

Las líneas de tendencia lineal, representadas con trazos discontinuos, indican que, a largo plazo, la cobertura de vegetación densa sigue un patrón de crecimiento sostenido, mientras que las áreas con escasa vegetación tienden a disminuir. Esto sugiere que, si se mantienen las acciones de

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

restauración y conservación de manera eficiente, el ecosistema podría continuar recuperándose, ayudando a mitigar los impactos negativos de la minería.

Figura 22: Líneas de tendencia de la serie temporal del NDVI

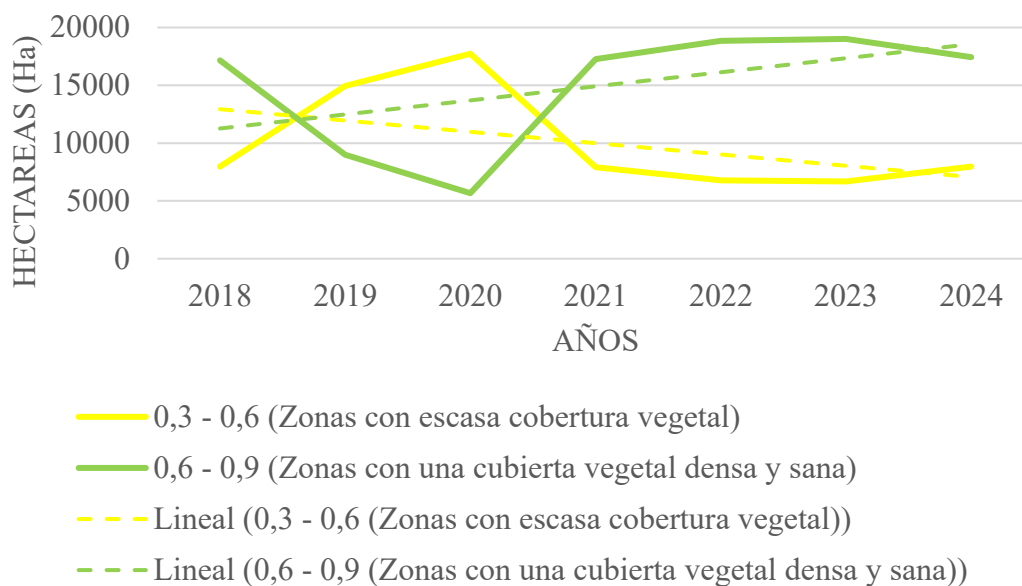


Tabla 5: Comparación resultados obtenidos vs informe de sostenibilidad

Informe de sostenibilidad 2024 (Área rehabilitada)	Resultados obtenidos del NDVI 2024 (Área con cobertura vegetal)
200 ha	2755.96 ha

La Tabla 5 compara los resultados obtenidos a través del análisis del NDVI en 2024 con la información reportada en el informe de sostenibilidad del mismo año. En el informe, se indica que las hectáreas rehabilitadas ascienden a 200 ha, mientras que el análisis del NDVI muestra que la cobertura vegetal total en el área de estudio alcanza las 2755.96 ha. Esta diferencia significativa sugiere que existen zonas con cobertura vegetal que no han sido oficialmente contabilizadas como áreas rehabilitadas, lo que podría deberse a la regeneración natural de la vegetación.

7 Discusión

Mediante el análisis temporal que abarca el periodo de 2018 a 2024, a partir de la Figura 19, es posible observar cómo los cambios en estas categorías reflejan tanto el impacto de la actividad minera como los efectos de las acciones de restauración implementadas. En los primeros años del estudio, se identificó una reducción en las zonas con vegetación densa, no obstante, con la puesta en marcha del Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI), se evidenció una recuperación progresiva en algunas áreas, reflejada en un aumento de la cobertura vegetal en determinados sectores. Esto muestra la pertinencia de las medidas aplicadas y evidencia la utilidad de las herramientas SIG en su seguimiento, propendiendo por la conservación de la biodiversidad y la regeneración de los ecosistemas.

El estudio se enfocó en examinar las variaciones en la cobertura vegetal provocadas por la explotación minera en El Cerrejón entre 2018 y 2024. Mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se evidenció que la actividad minera ha generado un impacto significativo y negativo en diversas zonas, especialmente en áreas cercanas a las operaciones extractivas. En estas regiones, los valores negativos del NDVI reflejaron una reducción considerable en la vegetación, lo que indica un deterioro preocupante en la salud del ecosistema. No obstante, el análisis también identificó signos de recuperación en ciertos sectores donde se han implementado estrategias de restauración dentro del Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI). En estas áreas, los valores positivos del NDVI sugieren que las iniciativas de reforestación y manejo ambiental han favorecido la regeneración de la cobertura vegetal, los cambios observados entre 2018 y 2024 muestran un escenario dual: mientras que la minería ha generado un impacto negativo notable, las medidas de restauración han comenzado a evidenciar resultados positivos, lo que indica que, con una gestión ambiental adecuada, es posible reducir algunos de los efectos adversos de la actividad minera sobre el ecosistema.

Los datos de la Figura 20 muestran que en el periodo del estudio el 7.56% (2691.867 ha) del área total ha sufrido una reducción en la vegetación, lo que podría estar relacionado con el impacto de las actividades mineras. Por otro lado, un 7.74% del territorio (2755.96 ha) evidencia un incremento en la cobertura vegetal, posiblemente debido a iniciativas de restauración ecológica

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

o a procesos de regeneración natural. La mayor parte de la superficie evaluada, que corresponde al 84.7% (30158.88 ha), no ha experimentado cambios significativos. Estos hallazgos ponen de manifiesto tanto los efectos de la minería en el ecosistema como la capacidad de recuperación de la vegetación en las áreas donde se han implementado acciones de restauración, lo que subraya la relevancia de continuar con estrategias de rehabilitación ambiental para favorecer la conservación de la biodiversidad.

El informe de sostenibilidad se basa en un enfoque que considera solo las áreas intervenidas directamente mediante estrategias de restauración, mientras que el NDVI permite una evaluación más amplia de la vegetación presente en la zona, incluyendo tanto la regeneración natural como la vegetación remanente. Esta diferencia de magnitud resalta la importancia de complementar los datos reportados en los informes oficiales con herramientas de teledetección para obtener una visión más completa y precisa del estado de la cobertura vegetal.

Así mismo, la información obtenida a partir del NDVI permite identificar la distribución espacial de la vegetación y evaluar de manera objetiva el impacto de las actividades de rehabilitación. Si bien los esfuerzos de restauración documentados en el informe de sostenibilidad representan un avance en la recuperación del ecosistema, el análisis de imágenes satelitales sugiere que la dinámica de la vegetación es más compleja y que la regeneración natural juega un papel clave en el proceso. Esto resalta la necesidad de continuar implementando estrategias de conservación y monitoreo ambiental para garantizar la recuperación sostenible del territorio afectado.

8 Conclusiones

La explotación minera en El Cerrejón ha generado un impacto negativo considerable en la cobertura vegetal, evidenciado a través de imágenes satelitales y la aplicación del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El análisis multitemporal ha evidenciado que la actividad minera ha alterado significativamente la vegetación local, causando deforestación y la pérdida de hábitat, lo que resalta la necesidad de llevar a cabo una evaluación continua de los efectos de la minería sobre el medio ambiente.

A pesar de los efectos adversos inicialmente observados, los resultados del análisis también muestran las medidas establecidas en el Plan de Manejo Ambiental Integrado (PMAI). Han tenido un efecto positivo; se evidencia el aumento en la densidad y salud de la vegetación en zonas intervenidas, lo que indica que las acciones de restauración y reforestación han favorecido la recuperación de áreas degradadas. Esta evidencia resalta la importancia de contar con un marco regulatorio y de gestión ambiental que promueva acciones efectivas para la conservación.

El análisis multitemporal realizado mediante la plataforma Google Earth Engine y el NDVI demostró ser una herramienta valiosa para cuantificar los cambios en la cobertura vegetal y clasificar áreas en pérdidas, ganancias o estabilidad. Ha sido fundamental para validar la efectividad de las acciones de manejo ambiental propuestas. Este enfoque permite no solo comprobar el estado de la vegetación en tiempos específicos, sino también evaluar la efectividad de las prácticas de restauración y reforestación en el área.

Sin embargo, los resultados advierten sobre la fragilidad de estos avances, ya que las áreas con pérdidas de vegetación continúan representando un riesgo significativo para la biodiversidad local y la salud del ecosistema. Esta afirmación se fundamenta en el análisis realizado mediante el NDVI, que ha revelado una clara correlación entre la disminución de la cobertura vegetal y la degradación de hábitats. La necesidad de un monitoreo continuo y de un manejo adaptativo se vuelve evidente, dado que las diferencias en el índice de vegetación reflejan no solo los impactos de la minería, sino también eventos naturales y otros factores antropogénicos que pueden influir en la dinámica de la vegetación en el futuro.

9 Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo basado en imágenes satelitales de alta resolución, con el fin de identificar de forma oportuna cualquier cambio significativo en la cobertura vegetal, y responder de manera más efectiva a los impactos negativos asociados con la actividad minera. Además, los datos obtenidos aportarían información útil para orientar decisiones que reduzcan los efectos sobre el ecosistema.

Para complementar los datos obtenidos a través del NDVI, es necesario realizar investigaciones en campo que permitan validar los hallazgos. Estos estudios deben incluir estudios sobre la salud del suelo, la biodiversidad y las condiciones ambientales que inciden en la recuperación de la vegetación, de modo que las conclusiones reflejen la realidad local.

Se propone implementar prácticas de gestión ambiental adaptativas, en las que las estrategias de restauración y prevención se ajusten de acuerdo con los cambios observados en el NDVI y en otros factores de impacto. Este enfoque flexible en la gestión permitirá responder de manera eficaz a los cambios que surjan y maximizar la efectividad de las acciones implementadas.

Es importante desarrollar programas de educación y sensibilización dirigidos a las comunidades locales y a los trabajadores del sector minero. Estos programas deben promover conocimientos sobre la importancia de conservar la cobertura vegetal lo que puede fortalecer el compromiso colectivo con la protección del medio ambiente y la sostenibilidad, así como generar cambios positivos en las actitudes y acciones locales.

Se recomienda promover la inclusión de criterios de sostenibilidad en las políticas y regulaciones relacionadas con la minería, de manera que la explotación de los recursos naturales se realice con la responsabilidad ambiental y contemple acciones orientadas a la conservación y regeneración de los ecosistemas afectados.

Fomentar la colaboración multidisciplinaria entre investigadores, autoridades ambientales, empresas mineras y organizaciones no gubernamentales. Esta cooperación permitirá compartir

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

conocimientos y mejores prácticas en la gestión ambiental y la efectividad de las medidas implementadas.

Es fundamental realizar evaluaciones periódicas de los proyectos de restauración implementados, utilizando el NDVI y otras herramientas que permitan medir objetivamente su efectividad. Este seguimiento facilitará ajustes oportunos y apoyará el éxito de las acciones de recuperación en el largo plazo. Además, se recomienda continuar con la investigación de nuevas tecnologías y metodologías en la evaluación remota y el análisis de datos que pueden mejorar significativamente la precisión y efectividad de los estudios sobre cambios en la cobertura vegetal y su relación con actividades humanas.

La versatilidad del NDVI como herramienta de análisis en el estudio de cambios en la cobertura vegetal. Su aplicación en el caso de la mina de El Cerrejón evidencia su valor para evaluar impactos ambientales asociados a la minería y lo posiciona como un modelo aplicable en otros contextos de actividad humana.

Referencias

- Alarcón Montaña, A. D., & Rozo Arango, M. A. (2021). Aplicación de índices espectrales para determinar la transformación del bosque seco en Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia). *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7070>
- Aramayo, V., Nosetto, M., & Cremona, M. V. (2024). Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios. *Investigaciones Geográficas*, 81. <https://doi.org/10.14198/ingeo.25246>
- Armenteras, D., Rodríguez, N., & Retana, J. (2013). Landscape Dynamics in Northwestern Amazonia: An Assessment of Pastures, Fire and Illicit Crops as Drivers of Tropical Deforestation. *PLoS ONE*, 8(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054310>
- Bolaños, J., Corrales, J. C., & Campo, L. V. (2023). Feasibility of Early Yield Prediction per Coffee Tree Based on Multispectral Aerial Imagery: Case of Arabica Coffee Crops in Cauca-Colombia. *Remote Sensing*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/rs15010282>
- Casamitjana, M., Torres-Madroño, M. C., Bernal-Riobo, J., & Varga, D. (2020). Soil moisture analysis by means of multispectral images according to land use and spatial resolution on andosols in the colombian andes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16). <https://doi.org/10.3390/app10165540>
- Cerrejón. (2010). *informe-de-sostenibilidad-2010*.
- Cerrejón. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023*. www.cerrejon.com
- Coppin, P. R., & Bauer, M. E. (1996). *Digital Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Imagery*. <http://www.informaworld.com/>
- Corpoguajira. (2019). *Plan-de-gestión-integral-de-residuos-sólidos-VI*.
- Correa, N.-A. (2020). Method for landslides detection with semi-automatic procedures: The case in the zone center-east of Cauca Department, Colombia. In *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*.
- Díaz Giraldo, R. A., Álvarez de León, M., Pérez López, O., Gutiérrez Parrado, S. L., & Arango Argoti, M. A. (2024). Aplicación de dos modelos basados en teledetección para estimar la producción primaria neta aérea en un sistema pastoril en la Altillanura colombiana. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 12(1). [https://doi.org/10.17138/tgft\(12\)24-35](https://doi.org/10.17138/tgft(12)24-35)
- Dody Morales Sánchez. (2013). *Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica*.

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

- Dube, T., & Mutanga, O. (2015). Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 36–46. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.11.001>
- Ernesto Roldán Taborda, Julio César Mesa García, & Germán Poveda. (2008). *Analisis-de-la-variabilidad-espacio-temporal-del-NDVI-en-Colombia-y-en-la-cuenca-Amazonica*.
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.05.017>
- Francisco Sacristán Romero. (2005). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Civilizar*, 5(9). <https://doi.org/10.22518/16578953.701>
- González, G. P., Toro Casas, V., Dorado Castillo, E. O., & Ramírez Castañeda, L. N. (2021). Evaluación de patrones temporales en la dinámica para el cambio de cobertura vegetal en zonas rurales tropicales durante el periodo 2013-2018. Caso de estudio Chaguani-Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. <https://doi.org/10.11144/javeriana.cdr18.eptd>
- Hernández Lozano, R., & Pavón, N. (2024). Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos. *Acta Universitaria*, 34. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3814>
- Ibrahim, E., Lema, L., Barnabé, P., Lacroix, P., & Pirard, E. (2020). Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102194>
- Im, J., Jensen, J. R., Coleman, M., & Nelson, E. (2009). Hyperspectral remote sensing analysis of short rotation woody crops grown with controlled nutrient and irrigation treatments. *Geocarto International*, 24(4), 293–312. <https://doi.org/10.1080/10106040802556207>
- Imhoff, M. L., Tucker, C. J., Lawrence, W. T., Stutzer, D. C., & Rusin, R. J. (2000). *The Use of Multi-source Satellite and Geospatial Data to Study the Effect of Urbanization on Primary Productivity in the United States*.
- Jaramillo, E., Portnoy, I., Torregroza-Espinosa, A. C., & Larios-Giraldo, P. (2024). Evolution of the Landscape's Vegetation Health Condition in a Tropical Coastal Lagoon: A Remote Sensing Study in the Case of Northern Colombia. *Procedia Computer Science*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.245>

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Unther Fischer, G. U., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. In *Global Environmental Change* (Vol. 11).
- Loma Pinto C, Y. LA. (2018). *Análisis de la pérdida de cobertura vegetal y los impactos ambientales hacia las comunidades utilizando imágenes satelitales, minería de carbón en Cerrejón*.
- Lunetta, R. L., Knight, F. K., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G., & Worthy, L. D. (2006). *Land-Cover Change Detection Using Multi-Temporal MODIS NDVI Data*.
- Mazlan, S. M., Jaafar, W. S. W. M., Kamarulzaman, A. M. M., Saad, S. N. M., Ghazali, N. M., Adrah, E., Maulud, K. N. A., Omar, H., Teh, Y. A., Dzulkifli, D., & Mahmud, M. R. (2023). A Review on the Use of LiDAR Remote Sensing for Forest Landscape Restoration. In *Concepts and Applications of Remote Sensing in Forestry* (pp. 49–74). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4200-6_3
- Mejía Ávila, D., Martínez Lara, Z., & Soto Barrera, V. C. (2023). Space–time modelling of a tropical wetland using multiscale images, vegetation indices and landscape metrics: case—Ayapel Wetland Complex, Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04734-3>
- Mejía, C. E., Andrade, H. J., & Segura, M. (2023). Biomass and carbon estimation with remote sensing tools in tropical dry forests of Tolima, Colombia. *Revista de Teledeteccion*, 2023(62). <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19242>
- Milenys, D., Posada, H., & Aristizábal, E. (2022). Artificial intelligence and machine learning model for spatial and temporal prediction of drought events in the department of Magdalena, Colombia. <https://Revistascientificas.Cuc.Edu.Co/Ingecuc/Article/View/3812>, 18(2).
- Millán, S., Rodríguez-Rodríguez, J. A., & Sierra-Correa, P. (2021). Delimitation and classification of coastal wetlands: Implications for the environmental management of the Colombian Continental Caribbean. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(1). <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.1.994>
- Molina, C. M., Wisniewski, K. D., Salamanca, A., Saumett, M., Rojas, C., Gómez, H., Baena, A., & Pringle, J. K. (2024). Monitoring of simulated clandestine graves of victims using UAVs,

- GPR, electrical tomography and conductivity over 4-8 years post-burial to aid forensic search investigators in Colombia, South America. *Forensic Science International*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111919>
- Moraiti, N., Mullissa, A., Rahn, E., Sassen, M., & Reiche, J. (2024). Critical Assessment of Cocoa Classification with Limited Reference Data: A Study in Côte d'Ivoire and Ghana Using Sentinel-2 and Random Forest Model. *Remote Sensing*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/rs16030598>
- Nasa, & Casi. (1978). *General Disclaimer*.
- Nuñez, Y., Hoyos, N., & Arellana, J. (2023). High land surface temperatures (LSTs) disproportionately affect vulnerable socioeconomic groups in Barranquilla, Colombia. *Urban Climate*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101757>
- Pasqualotto, N., Directores, V., Delegido Gómez, J., Wittenberghe, S. Van, & Moreno Méndez, J. (2020). *Estimation of key biophysical parameters related to crop stress through new remote sensors and multi-crop in situ data*.
- Perea Ardila, M. A., Leal Villamil, J., & Oviedo Barrero, F. (2021). Caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con Teledetección en el litoral Pacífico colombiano: Bajo Baudó, Chocó. *La Granja*, 34(2). <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.02>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 20, Issue 9, pp. 503–510). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. In *Climate Dynamics* (Vol. 36, Issues 11–12, pp. 2233–2249). <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda, G., Jaramillo, A., & Mantilla, R. (2002). *Asociación entre el fenómeno el niño y las anomalías de humedad de suelo y del índice "NDVI" en Colombia*.
- Preciado-Barragán, H., & Sanabria-Buitrago, M. (2022). Identificación de la variabilidad térmica de superficie entre 1999 y 2018 a través del análisis de imágenes satelitales. Estudio caso: municipio de Zipaquirá, Colombia. *Revista Ontare*, 9. <https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3179>

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). *I of natural vegetation*.

Sanjurjo-Vílchez, J., & Bendayán-Acosta, L. (2024). Erosión, sedimentación y dinámica lateral del río Amazonas entre la confluencia de los ríos Marañón-Ucayali y la localidad de Indiana - Loreto, Amazonía peruana. *Revista de Teledetección*, 63. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20142>

Souza, C. M., Roberts, D. A., Monteiro, A. L., & Souza, C. (2005). Multitemporal Analysis of Degraded Forests in the Southern Brazilian Amazon. In *Earth Interactions* • (Vol. 9). <http://EarthInteractions.org>

Suárez, H. L. A., Angarita, G. P. G., Castañeda, L. N. R., & Castro, P. P. C. (2022). Illicit Crops, Planning of Substitution with Sustainable Crops Based on Remote Sensing: Application in the Sierra Nevada of Santa Marta, Colombia. In *Climate Emergency – Managing, Building, and Delivering the Sustainable Development Goals*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79450-7_36

Tello-Cifuentes, L., & Díaz-Paz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *TecnoLógicas*, 24(50). <https://doi.org/10.22430/22565337.1710>

Torres-Bejarano, F., Torregroza-Espinosa, A. C., Martínez-Mera, E., & González-Márquez, L. C. (2023). Impact of land cover changes on water quality: an application to the Guájaro reservoir, Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04535-8>

Ulloa, A., Godfrid, J., Damonte, G., Quiroga, C., & Ana Paula López, L. (2021). Community hydric monitoring: Homegrown knowledge as local and environmental defense in Argentina, Peru and Colombia. *Iconos*, 69, 77–97. <https://doi.org/10.17141/iconos.69.2021.4489>

Vinasco, J. S., Rodríguez, D. A., Velásquez, S., Quintero, D. F., Livni, L. R., & Hernández, F. L. (2020). Coverage changes detection at ciénaga grande, Santa Marta – Colombia using automatic classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W12-2020. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w12-2020-195-2020>

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

- Wang, C., Solís, P., Villa, L., Khare, N., Wentz, E. A., & Gettel, A. (2021). Spatial Modeling and Analysis of Heat-Related Morbidity in Maricopa County, Arizona. *Journal of Urban Health*, 98(3), 344–361. <https://doi.org/10.1007/s11524-021-00520-7>
- Wei, B., Xie, Y., Wang, X., Jiao, J., He, S., Bie, Q., Jia, X., Xue, X., & Duan, H. (2020). Land cover mapping based on time-series MODIS-NDVI using a dynamic time warping approach: A casestudy of the agricultural pastoral ecotone of northern China. *Land Degradation and Development*, 31(8), 1050–1068. <https://doi.org/10.1002/ldr.3502>
- Wu, J., & Hobbs, R. (2002). Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology*, 17(4), 355–365. <https://doi.org/10.1023/A:1020561630963>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Anexos

Anexo 1

Imágenes con líneas de código aplicadas en GEE.

1. Selección y cargue de imágenes Sentinel-2A

```

1 //Selección y carga de imagen Sentinel 2 Nivel-2A
2 var imagen = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
3   .filterDate('2018-01-01', '2018-12-31')
4   .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 50))
5   .filterBounds(cerrejon)
6   .median();
7
8 print(imagen);
9 Map.addLayer(imagen);
10 Map.addLayer(cerrejon, {color: "red"});
11

```

2. Recorte de la imagen al área de estudio

```

12 //Recortar la imagen al area de estudio
13 var imagenClip = imagen.clip(cerrejon);
14
15 //parametros de visualizacion de la imagen
16 var paramsVisual = {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min: 1000, max: 5000, gamma: 2.1}; //2.1
17 Map.addLayer(imagenClip, paramsVisual, 'Sentinel 2 Nivel-2A'); |
18

```

3. Cálculo del NDVI

```

19 // |
20 Map.addLayer(cerrejon)
21 //NDVI
22 //Paso 4: Calcule el NDVI manualmente: NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)
23 //Esto se puede lograr utilizando operaciones de banda simples, .expression o .normalizedDifference
24 var nir = imagenClip.select('B8');
25 var red = imagenClip.select('B4');
26 var ndvi = nir.subtract(red).divide(nir.add(red)).rename('NDVI');
27
28 print(ndvi, 'NDVI El Cerrejon')
29
30 //visualizacion resultados NDVI
31 var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']};
32 Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'NDVI El Cerrejon');
33

```

4. Clasificación y análisis de rangos NDVI

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

```

34 // Clasificación y análisis de rangos NDVI
35 var ndviRanges = ndvi.expression(
36   '(b("NDVI") < 0) ? 1 : ' + // Agua u otros elementos no vegetales
37   '(b("NDVI") >= 0 && b("NDVI") < 0.3) ? 2 : ' + // Zonas estériles
38   '(b("NDVI") >= 0.3 && b("NDVI") < 0.6) ? 3 : ' + // Escasa cobertura vegetal
39   '(b("NDVI") >= 0.6 && b("NDVI") < 0.9) ? 4 : ' + // Vegetación densa y sana
40   '(b("NDVI") >= 0.9) ? 5 : ' + // Selvas tropicales
41   '0' // Default (por si acaso)
42 )
43 ).rename('NDVI_Ranges').clip(cerrejon); // PARA RECORTAR EL POLIGONO
44
45 // Parámetros de visualización para los rangos de NDVI
46 var rangeParams = { min: 1, max: 5, palette: ['red', 'orange', 'yellow', 'green', 'darkgreen'], // Colores para cada rango
47 };
48
49 // Agregar la capa de NDVI categorizado al mapa
50 Map.addLayer(ndviRanges, rangeParams, 'NDVI_Ranges');
51

```

5. Cálculo de proporciones de cada categoría

```

52 // Calcular la proporción de píxeles en cada rango
53 var histogram = ndviRanges.reduceRegion({
54   reducer: ee.Reducer.frequencyHistogram(),
55   geometry:errejon,
56   scale: 250,
57   maxPixels: 1e13
58 });
59
60 // Imprimir los resultados del histograma
61 print('Histogram of NDVI ranges:', histogram);
62
63 // Extraer los valores del histograma y calcular proporciones
64 var areaCounts = ee.Dictionary(histogram.get('NDVI_Ranges'));
65 var totalPixels = areaCounts.values().reduce(ee.Reducer.sum());
66 var proportions = areaCounts.map(function(key, value) {
67   return ee.Number(value).divide(totalPixels).multiply(100);
68 });
69
70 // Imprimir las proporciones en la consola
71 print('Proportions of NDVI ranges (%):', proportions);
72

```

6. Exportación de resultados

```

73 // EXPORTAR DRIVE
74 // var sentinelpuno = imagenClip.select(['B11', 'B8', 'B4']); // PARA EXPORTAR IMAGEN POR BANDAS
75 Export.image.toDrive({
76   image: ndviRanges,
77   description: 'NDVI_Ranges_Cerrejon',
78   folder: 'GEE_NDVI',
79   fileNamePrefix: 'NDVI_Ranges_Cerrejon',
80   region:errejon,
81   scale: 10,
82   maxPixels: 1e13,
83 });

```

7. Cálculo de diferencia de NDVI

Análisis de los cambios en la cobertura vegetal producto de la explotación minera de El Cerrejón.....

```

Imports (1 entry)
var cerrejon: Table projects/ee-monicaflores951/assets/Poligono_Cerrejon
1 // 1. Cargar imágenes Sentinel-2 para 2018 y 2024
2 var imagen2018 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
3   .filterDate('2018-01-01', '2018-12-31')
4   .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 30))
5   .filterBounds(cerrejon)
6   .median()
7   .clip(cerrejon.geometry()); // Convertir cerrejon a geometría explícitamente
8
9 var imagen2024 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
10  .filterDate('2024-01-01', '2024-12-31')
11  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 30))
12  .filterBounds(cerrejon)
13  .median()
14  .clip(cerrejon.geometry()); // Convertir cerrejon a geometría explícitamente
15
16 // 2. Calcular el NDVI para cada año
17 var ndvi2018 = imagen2018.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI_2018');
18 var ndvi2024 = imagen2024.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI_2024');
19
20 // 3. Calcular la diferencia de NDVI
21 var ndviDifference = ndvi2024.subtract(ndvi2018).rename('NDVI_Difference');
22
23 // 4. Clasificar los cambios de NDVI
24 var loss = ndviDifference.lt(-0.2).rename('loss');
25 var stable = ndviDifference.gte(-0.2).and(ndviDifference.lte(0.2)).rename('stable');
26 var gain = ndviDifference.gt(0.2).rename('gain');
27
28 // 5. Calcular el área total en hectáreas
29 var totalArea = cerrejon.geometry().area().divide(10000); // Convertir m² a ha
30

```

8. Cálculo de porcentaje para cada categoría de diferencia

```

30
31 // 6. Calcular áreas de pérdida, estabilidad y ganancia en ha
32 var pixelArea = ee.Image.pixelArea().divide(10000); // Convertir m² a ha
33 var lossArea = loss.multiply(pixelArea);
34 var stableArea = stable.multiply(pixelArea);
35 var gainArea = gain.multiply(pixelArea);
36
37 // 7. Reducir al total por región
38 var stats = lossArea.addBands([stableArea, gainArea])
39   .reduceRegion({
40     reducer: ee.Reducer.sum(),
41     geometry: cerrejon.geometry(), // Asegurar que sea una geometría
42     scale: 10,
43     maxPixels: 1e13
44   });
45
46 // 8. Calcular porcentajes de cada categoría
47 var lossPercent = ee.Number(stats.get('loss')).divide(totalArea).multiply(100);
48 var stablePercent = ee.Number(stats.get('stable')).divide(totalArea).multiply(100);
49 var gainPercent = ee.Number(stats.get('gain')).divide(totalArea).multiply(100);
50
51 // 9. Visualizar resultados en el mapa
52 Map.centerObject(cerrejon, 10);
53 Map.addLayer(ndvi2018, {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']}, 'NDVI 2018');
54 Map.addLayer(ndvi2024, {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']}, 'NDVI 2024');
55 Map.addLayer(ndviDifference, {min: -0.5, max: 0.5, palette: ['red', 'white', 'green']}, 'Diferencia NDVI (2024 - 2018)');
56

```