



Incendios en la Sierra Nevada de Santa Marta en enero de 2024: análisis de severidad con imágenes satelitales

Derian Alejandro Sánchez Tapiero

John Diego Caicedo Imbachi

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

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual

Manizales, Caldas, Colombia

2025



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, I

Declaración de inteligencia artificial: El o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT y Notebook, 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.

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.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, por su guía incondicional, sus sabios consejos y el apoyo constante que me han brindado a lo largo de este proceso. A Dios, por iluminar mi camino con propósito y fortaleza en cada etapa. Su presencia fue un pilar esencial para la culminación de este trabajo. Adicionalmente, mi más sincero agradecimiento a la Agencia Espacial Europea (ESA) por el libre acceso a las imágenes del programa Copernicus y Sentinel-2. Igualmente, extendo mi reconocimiento a Parques Nacionales Naturales de Colombia y al IDEAM, cuyos reportes oficiales y datos públicos fueron esenciales para el contexto y la validación de los hallazgos que aquí se presentan.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1. Planteamiento del Problema	14
1.1. Descripción del Área Problemática.....	14
1.2. Formulación del Problema	16
1.3. Antecedentes	18
2. Justificación	23
3. Objetivos	24
3.1. Objetivo General	24
3.2. Objetivos Específicos	24
4. Marco Teórico.....	25
4.1. Incendios Forestales y la Sierra Nevada de Santa Marta	25
4.2. Espectro Electromagnético.....	26
4.3. Sentinel-2	27
4.4. Evaluación de la Severidad de Incendios	28

4.5.	Avances Metodológicos en la Evaluación de Severidad de Incendios Mediante Teledetección.....	30
4.5.1.	Sensores Satelitales Complementarios y sus Aplicaciones.....	31
4.5.2.	Índices Espectrales Avanzados para Evaluación de Severidad.....	31
5.	Metodología.....	33
5.1.	Enfoque Metodológico.....	33
5.2.	Tipo de Estudio.....	33
5.3.	Procedimiento.....	33
5.3.1.	Detectar y Cuantificar el Área Quemada.....	34
5.3.1.1.	Fase 1: Obtención de Datos.. ..	35
5.3.1.2.	Fase 2: Procesamiento de Imágenes.. ..	35
5.3.1.3.	Fase 3: Delimitación y Cuantificación del Área de Incendio.....	36
5.3.2.	Comparación de los Índices Espectrales.....	37
5.3.2.1.	Fase 1: Comparación de los Índices Espectrales.. ..	37
5.3.3.	Severidad de los Incendios Forestales.....	40
5.3.3.1.	Fase 1: Análisis de la Severidad de los Incendios Forestales.....	40
6.	Resultados.....	42

6.1.	Cartografía del Impacto del Fuego en la Vegetación y Suelo.....	42
6.2.	Comparación de los Índices Espectrales	46
6.2.1.	Sentinel-2	46
6.2.1.1.	NBR y dNBR.....	46
6.2.1.2.	NDVI y dNDVI.....	48
6.2.1.3.	EVI y dEVI	49
6.2.1.4.	SAVI.....	50
6.2.1.5.	BAI.....	51
6.2.1.6.	NDre2.....	52
6.3.	Severidad de los incendios forestales	53
7.	Discusión.....	55
8.	Conclusiones	57
9.	Recomendaciones	58
	Referencias	59

Lista de tablas

Tabla 1. Información de las bandas Sentinel-2	28
Tabla 2. Comparativa de índices espectrales.....	38
Tabla 3. Actividad fotosintética según índice NDVI.	40
Tabla 4. Categorización de severidad para dNBR.	41

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM).....	16
Figura 2. Espectro electromagnético.....	27
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología de investigación.	34
Figura 4. Incendios forestales del 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM.....	43
Figura 5. Mapa de delimitación del impacto del fuego en la vegetación y suelo.	44
Figura 6. Área quemada según los índices NBR, NDVI, NDre2 y banda espectral (11, 8a y 4) .45	
Figura 7. Mapa de NBR y variación temporal del índice entre dos fechas (dNBR).....	47
Figura 8. Mapa de NDVI y variación temporal del índice entre dos fechas (dNDVI)	48
Figura 9. Mapa de EVI y variación temporal del índice entre dos fechas (dEVI).....	49
Figura 10. Mapa de SAVI preincendio y postincendio.....	50
Figura 11. Mapa de BAI postincendio	51
Figura 12. Mapa de NDre2 preincendio y postincendio	52
Figura 13. Mapa de Severidad de los incendios forestales basado en el índice dNBR.....	54

Siglas, acrónimos y abreviaturas

BAI	Burn Area Index
BOA	Botton of Atmosphere
dEVI	Differenced Enhanced Vegetation Index
dNDVI	Differenced Normalized Difference Vegetation Index
dNBR	Differenced Normalized Burn Ratio
EROS	Earth Resources Observation and science
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization
MSI	MultiSpectral Instrument
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
NDre2	Normalized Difference Red Edge 2
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NBR	Normalized Burn Ratio
NIR	Near Infrared
ONIC	Organización Nacional Indígena de Colombia
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SNSM	Sierra Nevada de Santa Marta
SWIR	Shortwave Infrared
TIR	Thermal Infrared
TOA	Top of Atmosphere
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator

VIIRS

Visible Infrared Imaging Radiometer

Resumen

Este estudio analiza la severidad de los incendios ocurridos en enero de 2024 en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Colombia, un *hotspot* de biodiversidad amenazado debido al aumento de incendios forestales en la última década. Mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2, se calcularon índices espectrales como dNBR y NDVI para evaluar el impacto en la vegetación y los suelos. La metodología se desarrolló en cinco fases secuenciales: (1) adquisición de imágenes; (2) cálculo de índices de reflectividad; (3) detección y cuantificación del área quemada; (4) comparación de los índices espectrales, y (5) evaluación de la severidad de los incendios forestales. Los resultados generaron mapas detallados que identificaron 210,95 hectáreas afectadas, de las cuales el 75.9% presentó severidad moderada a severa. Este trabajo combina técnicas de teledetección y ofrece un modelo aplicable a otros ecosistemas tropicales montañosos vulnerables, proporcionando una base fundamental para la restauración de este ecosistema estratégico.

Palabras clave: sensores satelitales, teledetección, índices espectrales, cambio climático, evaluación postincendio, Colombia y Sentinel 2.

Abstract

This study analyzes the severity of the January 2024 wildfires in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Colombia, a biodiversity hotspot threatened by increasing forest fires over the past decade. Through the processing of Sentinel-2 satellite imagery, spectral indices such as dNBR and NDVI were calculated to assess impacts on vegetation and soils. The methodology was implemented in five sequential phases: (1) image acquisition; (2) calculation of reflectance indices; (3) detection and quantification of the burned area; (4) comparison of spectral indices, and (5) assessment of wildfire severity. The results produced detailed maps that identified 210,95 affected hectares, of which 75,9% showed moderate to severe severity. This work combines remote sensing techniques and offers a model applicable to other vulnerable tropical montane ecosystems, providing a fundamental basis for the restoration of this strategic ecosystem.

Keywords: satellite sensors, remote sensing, spectral indices, climate change, post-fire assessment, Colombia y Sentinel 2.

Introducción

Los incendios forestales en Colombia representan una problemática creciente que afecta significativamente ecosistemas estratégicos como la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). La falta de herramientas tecnológicas adecuadas dificulta el monitoreo y la respuesta oportuna, lo que ocasiona pérdidas económicas, afecta a la biodiversidad y genera riesgo para las comunidades locales. Es urgente contar con sistemas que permitan caracterizar incendios forestales y evaluar su impacto para una toma de decisiones eficientes. En pocas palabras, Colombia necesita mejorar su capacidad para enfrentar los incendios forestales. Al utilizar tecnología como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos satelitales, se podrían tomar decisiones acertadas para proteger los ecosistemas y la población.

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), reconocida como el sistema montañoso costero más alto del mundo y declarada reserva de la biosfera UNESCO (Rodríguez Eraso et al., 2013), enfrenta una creciente vulnerabilidad frente a los incendios forestales. Estos eventos, intensificados por actividades antropogénicas y cambios climáticos (IDEAM, 2022), comprometen su biodiversidad única y servicios ecosistémicos críticos para comunidades indígenas y poblaciones locales. No obstante, existe una limitada cuantificación precisa de la severidad y extensión de los incendios forestales ocurridos en la SNSM, lo que dificulta la implementación de estrategias efectivas de restauración y prevención. Por consiguiente, se hace necesario realizar un análisis de severidad de los incendios forestales ocurridos el 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM usando los índices satelitales del sensor remoto Sentinel-2, aplicando índices espectrales como el NBR (Normalized Burn Ratio), que permite evaluar daños en la cobertura vegetal con precisión espacial (Key & Benson, 2006).

Los índices satelitales se han consolidado como herramientas valiosas para evaluar la gravedad de los incendios forestales al proporcionar información sobre la magnitud del impacto en la vegetación y el suelo (Morgan et al., 2014).

La información obtenida mediante índices espectrales después de un incendio forestal resulta esencial para el monitoreo de múltiples procesos ecológicos (Chuvienco, 2009). Entre estos procesos se incluyen la erosión del suelo, la recuperación de áreas quemadas y la evolución del régimen del fuego entre otros (Hudak et al., 2007; Díaz-Delgado et al., 2004).

1. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Área Problemática

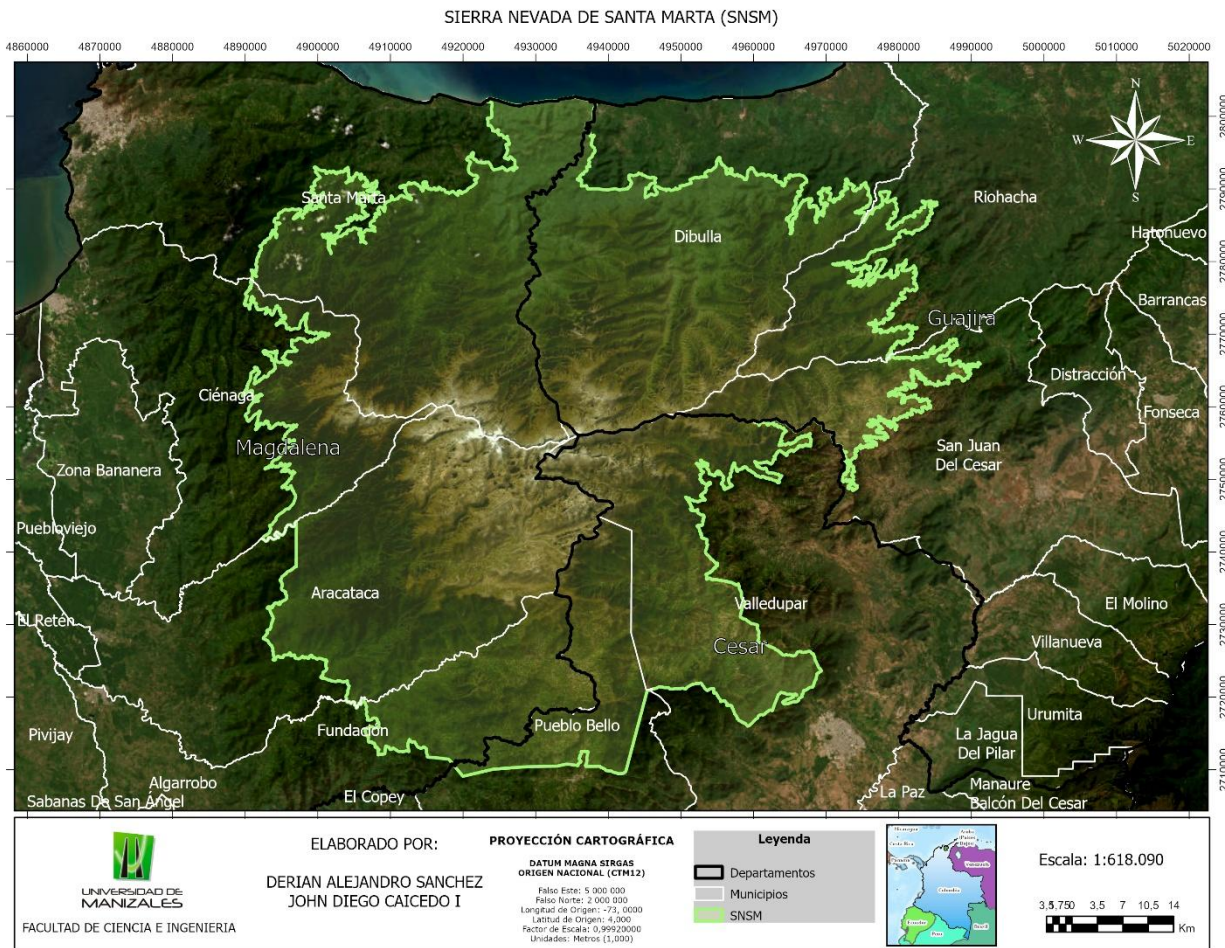
Para el presente proyecto se selecciona la Sierra Nevada de Santa Marta (en adelante SNSM), ubicada en el norte de Colombia (entre los departamentos de Magdalena, La Guajira y Cesar) es un macizo montañoso costero único en el mundo, declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1979 (UNESCO, 2021). Con una extensión de aproximadamente 17,000 km², se eleva desde el nivel del mar hasta los 5,775 metros en los picos Bolívar y Colón, lo que la convierte en la montaña costera más alta del planeta. Además, de acuerdo con el IDEAM (2021) es la fuente de 36 cuencas hidrográficas que abastecen de agua a más de 1.5 millones de personas en departamentos aledaños, incluyendo ciudades como Santa Marta y Valledupar.

De acuerdo con la Organización Nacional Indígena de Colombia (ONIC) (2022) la SNSM es sagrada para cuatro pueblos indígenas: Arhuaco, Kogui, Wiwa y Kankuamo, quienes la denominan "El Corazón del Mundo". Estos grupos mantienen prácticas ancestrales de conservación basadas en el equilibrio entre el hombre y la naturaleza, y según Rengifo et al. (2016) en aves la SNSM está categorizada como un área de endemismo aviar en donde se han registrado el 35,45% de las especies de aves de Colombia, y cerca del 7% de las aves del mundo.

La expansión de la agricultura (café, palma africana), la ganadería extensiva, el turismo no regulado y los cultivos ilícitos han acelerado la deforestación, con una tasa de 1,200 hectáreas anuales entre 2016 y 2021 (Armenteras et al., 2021).

Figura 1.

Mapa de localización de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM).



Nota: La figura muestra la delimitación de la SNSM en los departamentos de Magdalena, Cesar y Guajira. Fuente: Elaboración propia.

1.2. Formulación del Problema

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un ecosistema clave en Colombia, destacado por su biodiversidad y alto nivel de endemismo. Reconocida por la UNESCO como Reserva de la Biosfera (UNESCO, 2021), la SNSM enfrenta amenazas paulatinamente debido a incendios forestales, generados por actividades humanas como quemas agrícolas y turismo no regulado,

además de eventos climáticos extremos como el fenómeno de El Niño (IDEAM, 2021). Según estudios de Armenteras et al. (2021), la incidencia de incendios en la SNSM ha aumentado un 35% durante la última década, afectando la regeneración de especies esenciales como el roble andino (*Quercus humboldtii*) y el frailejón (*Espeletia spp.*).

Según Peñaloza y Peñaloza (s. f.), la primera conflagración ocurrió el pasado 26 de enero de 2024 en la cuenca del río Don Diego, jurisdicción de Santa Marta, y avanzó hasta la cuenca de Río Frío y fue controlado por los brigadistas con apoyo del pueblo Kogui. Las llamas se extinguieron el 29 de enero de 2024. Además, Valentina Chaves Hoyos, funcionaria de Parques Nacionales Naturales, agregó que la segunda conflagración se originó el 28 de enero de 2024, con dos focos de calor en la cuenca del río Sevilla y fue controlado el 31 de enero de 2024 y liquidado el 3 de febrero de 2024.

Según Donado (2024), el 29 de enero de 2024 las comunidades de los corregimientos Palmor de la Sierra y Uranio, ubicados en la parte alta de la Sierra Nevada de Santa Marta, reportaron que continúan activos los incendios cerca de los páramos en el municipio de Ciénaga, departamento del Magdalena, amenazando el páramo donde nacen los ríos Tucurínca, Sevilla, Frío y Chegúa. Ante esta situación crítica, el gobierno y las entidades ambientales desplegaron una respuesta contundente. Se activaron equipos especializados como carrotanques, helicópteros, brigadas comunitarias y personal de emergencias para combatir los incendios y minimizar sus efectos.

A pesar de la gravedad de los incendios en la SNSM, existe una limitada cuantificación precisa de su severidad y extensión, lo que dificulta la implementación de estrategias efectivas de restauración y prevención. Los métodos tradicionales de evaluación postincendio son costosos y de cobertura limitada, mientras que las imágenes satelitales Sentinel-2 ofrecen una alternativa eficiente para analizar grandes áreas. No obstante, persisten vacíos sobre el desempeño de sensores

como Sentinel-2 en ecosistemas tropicales montañosos, donde factores como la nubosidad y la resolución espacial influyen en la precisión (Drusch et al., 2012; Wulder et al., 2016).

Por lo expuesto previamente, se hace necesario realizar un análisis de severidad de los incendios forestales ocurridos el 26 y 28 de enero de 2024 en la Sierra Nevada de Santa Marta usando los índices satelitales del sensor remoto Sentinel-2.

1.3. Antecedentes

La investigación sobre incendios forestales y su severidad ha sido abordada globalmente y a lo largo de la historia, desde múltiples perspectivas. El interés por estos eventos surge a partir de los grandes impactos sociológicos que derivan, en particular, en regiones de alta diversidad. Swetnam et al. (2016) evaluaron, mediante análisis multiescala, la relación entre el clima, la actividad humana y los regímenes de incendios en ecosistemas templados, en un estudio que demuestra cómo el cambio en estos parámetros altera de forma significativa los patrones de incendios, estableciendo así un marco de referencia para entender estos fenómenos en otros contextos. Safford et al. (2022) estudiaron los incendios forestales en California, identificando un aumento significativo en su frecuencia e intensidad y cambio en los patrones durante un año en particular, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo constante; esto debido a que no resuelve la duda de si el año evaluado presenta anomalías, si hay un retorno a otros patrones anteriores o históricos o si esta información se puede usar para predecir condiciones de incendios extremos. Sayedi et al. (2024) ampliaron este análisis a escala planetaria, demostrando que las actividades humanas están modificando los regímenes naturales de incendios mediante fenómenos como el calentamiento global, causando un incremento y severidad de eventos extremos; la severidad de los incendios está impulsada por un conjunto de factores que van desde aspectos climáticos hasta cambios inducidos por humanos. Estos estudios resaltan la importancia de monitorear y analizar

las tendencias locales, y evaluar si están alineadas con las tendencias globales y cómo, en su conjunto, impactan los ecosistemas.

Al ahondar en aspectos metodológicos, la teledetección juega un papel fundamental y diversos investigadores han desarrollado herramientas de teledetección para evaluar la severidad de incendios. Miller y Thode (2007) proponen el dNBR relativo (Differenced Normalized Burn Ratio), superando ciertas limitaciones en la evaluación de paisajes heterogéneos. Bajo los mismos principios, la metodología posteriormente fue adaptada por Pacheco Ramos et al. (2025) para su aplicación en la Amazonía central, ajustando los umbrales para el índice Δ NBR (delta Normalized Burn Ratio). Howe et al. (2022) realizaron una comparación entre las efectividades de Sentinel-2 y Landsat 8 para mapear la severidad de los incendios, ambos sensores son útiles para identificar las áreas quemadas y determinar el grado de daño, sin embargo, se ha determinado que el primero ofrece ventajas significativas en la discriminación de niveles de severidad durante las primeras etapas postincendio. Estos estudios evidencian que existen metodologías robustas, adaptables a contextos específicos, como la Sierra Nevada de Santa Marta, y que existen herramientas satelitales avanzadas, como Sentinel-2, que en conjunto proporcionan una base sólida y actualizada para evaluar la severidad de los incendios en los diversos ecosistemas de Colombia, especialmente en las etapas tempranas postincendio.

La inteligencia artificial y su constante desarrollo han realizado grandes aportes al análisis de incendios forestales. Pham et al. (2020) evaluaron diez algoritmos diferentes de machine learning para evaluar la capacidad de predecir la ocurrencia y la propagación de incendios, identificando al Random Forest como el más efectivo para predecir incendios en zonas tropicales. Alkhatib et al. (2023) realizaron una revisión sistemática de técnicas de IA aplicadas a incendios, explorando como se utilizan para modelar la ocurrencia de incendios, predecir su propagación y evaluar los daños postincendio y destacando la importancia de seleccionar adecuadamente las

variables de entrada, como los índices NDVI y dNBR. La inteligencia artificial y el machine learning, mediante algoritmos como Random Forest y Redes Neuronales, están incrementando de forma significativa la capacidad de predecir la ocurrencia y propagación de incendios, mejorar la detección de áreas afectadas y evaluar los daños postincendio, demostrando ser herramientas cada vez más efectivas, cuya optimización depende críticamente de la adecuada selección de variables de entrada.

En el contexto de ecosistemas tropicales y de montaña, diversos estudios han aportado conocimientos valiosos. Borrelli et al. (2015) demostraron la vulnerabilidad del páramo andino a los incendios recurrentes, recomendando el uso de sensores de alta resolución para su monitoreo. Armenteras et al. (2021) cuantificaron el impacto de los incendios en la biodiversidad de bosques tropicales, estableciendo una clara relación con procesos de deforestación. González et al. (2024) desarrollaron un modelo integral para la gestión postincendio en Vilcabamba, Ecuador, incorporando variables topográficas y climáticas en su análisis. Estos estudios son una muestra de lo diversa que puede ser la naturaleza de los impactos de los incendios, la vulnerabilidad de ciertos ecosistemas y la necesidad de desarrollar estrategias de gestión postincendio integrales, proporcionando un valioso marco de referencia para entender las particularidades de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Para Colombia, varias investigaciones han sentado precedentes de gran relevancia. Jiménez et al. (2016) analizaron los patrones espaciales de incendios en Antioquia, revelando relaciones significativas entre tipos de cobertura vegetal y dinámica de propagación. Duran-Izquierdo y Olivero-Verbel (2021) evaluaron la vulnerabilidad de la SNSM ante incendios forestales, identificando las actividades agropecuarias y el cambio climático como factores determinantes. Cisneros Vaca et al. (2024) implementaron metodologías basadas en Sentinel-2 para el monitoreo de incendios en Ecuador, cuyos resultados son particularmente relevantes por las similitudes

ecológicas con la zona de estudio. Estos antecedentes resaltan la importancia de una estrategia de gestión de incendios exitosa, que debe ser holística, considerando las dinámicas del paisaje, las presiones humanas, las tendencias climáticas y las herramientas de monitoreo espacial para una respuesta efectiva y adaptada a las condiciones locales.

La evaluación de severidad mediante índices espectrales ha sido ampliamente documentada. Ghazali et al. (2025) validaron la efectividad del índice dNBR en bosques tropicales, demostrando su capacidad para diferenciar niveles de severidad. Boudjemline (2021) aplicó esta metodología en Argelia utilizando imágenes Sentinel-2, obteniendo resultados precisos en la delimitación de áreas afectadas. Montealegre et al. (2014) combinaron datos LIDAR con imágenes Landsat en ambientes mediterráneos, estableciendo nuevos estándares para la evaluación de daños postincendio. Podemos concluir que la teledetección, especialmente a través del índice dNBR y la combinación de datos ópticos (Sentinel-2, Landsat) con datos LIDAR, proporciona herramientas robustas y adaptables para el mapeo y la evaluación de la severidad de incendios en diversos biomas, permitiendo una gestión más precisa y efectiva de los recursos forestales postincendio.

Estudios anteriores y recientes han explorado la relación entre incendios y variables ambientales. Pradhan et al. (2007) desarrollaron mapas de susceptibilidad incorporando factores topográficos y climáticos, sentando las bases para los sistemas de alerta temprana. Jodhani et al. (2024) investigaron la correlación entre severidad de incendios y temperatura superficial en India, utilizando plataformas de procesamiento en la nube. McDonald et al. (2025) propusieron un innovador método basado en isótopos de oxígeno en cortezas de árboles para estimar severidad histórica. Estos enfoques multidimensionales subrayan la evolución y la creciente diversificación de las metodologías para comprender, predecir y cuantificar los incendios forestales y su severidad.

En el campo de la teledetección aplicada a la conservación, Bahramvash Shams et al. (2025) evaluaron el impacto de prácticas de conservación en la recuperación postincendio de bosques de

coníferas. Mehmood et al. (2024) desarrollaron modelos predictivos para bosques de *Pinus gerardiana*, integrando variables ecológicas y datos satelitales. O'Connor et al. (2014) analizaron cómo la severidad de incendios varía según gradientes ecológicos en Arizona, proporcionando insights valiosos para ecosistemas montañosos. La síntesis de estos estudios sugiere que la gestión de incendios forestales y la restauración postincendio deben ser adaptadas al contexto ecológico específico, considerando las prácticas de conservación, las características de las especies arbóreas dominantes y los gradientes ambientales, para optimizar la recuperación de los ecosistemas y mejorar la resiliencia ante futuros incendios.

El monitoreo y la gestión efectiva de incendios forestales se benefician enormemente de la integración de datos de múltiples sensores. Varios investigadores han aportado conocimientos en este sentido; Pinto et al. (2021) desarrollaron un método práctico para monitorear áreas quemadas combinando Sentinel-2 y VIIRS. Sultan et al. (2025) crearon modelos de indicadores de incendios para bosques protegidos en India, utilizando técnicas de machine learning. Tselka et al. (2023) implementaron Google Earth Engine para la cartografía de áreas quemadas en el Mediterráneo, demostrando la eficacia de estas plataformas. El uso de plataformas de procesamiento en la nube y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático, proporcionan herramientas escalables y precisas para la detección temprana, la evaluación de daños y la predicción del riesgo de incendios en diversos entornos, estos estudios ofrecen valiosas lecciones metodológicas aplicables al contexto colombiano.

Finalmente, en el ámbito nacional, trabajos como el de Armenteras et al. (2021) han documentado la pérdida de bosques biodiversos por incendios en Latinoamérica, mientras que Jiménez et al. (2016) proporcionaron herramientas para analizar el comportamiento del fuego en paisajes colombianos. Santos et al. (2019) desarrollaron métodos para monitorear dinámicas forestales con datos limitados, particularmente útiles para zonas con escasa información. La

convergencia de estos estudios pone de manifiesto que la lucha contra la pérdida de biodiversidad causada por incendios en Latinoamérica requiere, de manera urgente, el desarrollo y la aplicación de herramientas de análisis y monitoreo adaptadas a la escasez de datos, con el fin de comprender mejor el comportamiento del fuego en paisajes específicos y así mitigar los impactos en los ecosistemas más vulnerables.

2. Justificación

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2023) informa que en 2022 se registraron 4.887 incendios forestales en Colombia, mostrando un preocupante aumento del 25% respecto al año anterior. Los incendios forestales representan un factor de alteración que afecta los ecosistemas boscosos de diversas formas, dependiendo de su frecuencia y gravedad (Di Bella et al., 2008). Luego de un incendio, el ecosistema experimenta cambios inmediatos, como la pérdida de materia orgánica y modificaciones químicas y físicas en la materia inorgánica. Además, la capacidad de la vegetación para sobrevivir a corto y mediano plazo depende de múltiples factores biofísicos, incluyendo la presencia de bancos de semillas resistentes al fuego, la ubicación geográfica, la topografía, las condiciones climáticas y efectos secundarios como la erosión. Asimismo, la acumulación de cenizas influye temporalmente en la respuesta ambiental de la zona afectada (Montorio et al., 2015). Además, los incendios forestales generan significativas pérdidas ambientales, no solo por la alteración o destrucción de los ecosistemas, sino también por su impacto en el incremento de carbono liberado a la atmósfera (Van Der Werf et al., 2017).

Por otro lado, los índices satelitales han demostrado ser herramientas valiosas para evaluar la gravedad de los incendios forestales, ya que generalmente ofrecen una combinación de datos sobre la magnitud del impacto inmediato en la vegetación y el suelo (Morgan et al., 2014). En áreas con árboles cuyas copas han sido parcialmente afectadas, estos índices pueden detectar cambios en el follaje debido al fuego, en zonas donde la vegetación ha sido completamente consumida, los

índices permiten medir la transformación del matorral o el suelo, según el nivel de afectación (Arellano et al., 2017).

El uso de índices satelitales facilita el análisis espacial de la severidad del fuego, la estimación de daños en áreas de difícil acceso, reduciendo el tiempo necesario para la recopilación de datos en campo. La información obtenida mediante índices espectrales resulta esencial para el monitoreo posterior al incendio de múltiples procesos ecológicos (Chuvienco, 2009), como la erosión del suelo, la recuperación de áreas quemadas y la evolución del régimen del fuego, entre otros (Hudak et al., 2007; Díaz-Delgado et al., 2004).

Por lo anterior, esta investigación es de carácter práctico y realizará un análisis de los niveles de severidad y la afectación del incendio forestal ocurrido el 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM mediante el uso de índices satelitales del sensor remoto Sentinel-2 MSI.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar la severidad de los incendios forestales registrados el 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM, mediante el cálculo de distintos índices espectrales a partir de imágenes Sentinel-2.

3.2. Objetivos Específicos

- Delimitar y cuantificar el área afectada por los incendios forestales del 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM.
- Evaluar el impacto del fuego en la vegetación y el suelo empleando índices de reflectividad.
- Evaluar la severidad de los incendios forestales.

4. Marco Teórico

4.1. Incendios Forestales y la Sierra Nevada de Santa Marta

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) constituye un ecosistema estratégico a nivel nacional e internacional, reconocido como Reserva de la Biosfera por la UNESCO (2021) y territorio sagrado para cuatro pueblos indígenas (ONIC, 2022). Sin embargo, este macizo montañoso enfrenta una creciente presión por incendios forestales, cuya frecuencia ha aumentado un 35% en la última década (Armenteras et al., 2021). Los eventos de enero de 2024 en las cuencas de los ríos Don Diego y Sevilla (Peñaloza y Peñaloza, s.f., 2024) ejemplifican la vulnerabilidad del área, donde convergen factores climáticos (fenómeno de El Niño, IDEAM 2021) y antropogénicos (expansión agrícola, turismo no regulado).

En este contexto, es evidente la necesidad de evaluar la severidad de los incendios mediante tecnologías de teledetección, un enfoque que resulta de gran importancia al examinar tres aspectos críticos. En primer lugar, estudios recientes como el de Duran-Izquierdo y Olivero-Verbel (2021) demuestran que aproximadamente el 44% de los ecosistemas de la SNSM presentan una marcada susceptibilidad a procesos de degradación irreversible tras eventos de incendio, particularmente en zonas de páramo y bosque nublado donde el suelo tarda décadas en recuperar sus propiedades originales. En segundo término, la vulnerabilidad de áreas de endemismo y lugares importantes para la conservación, documentada por el Instituto Humboldt (2021, 2022), adquiere especial relevancia, ya que presenta especies que muestran una capacidad de regeneración postincendio significativamente menor en comparación con vegetación pionera (*Quercus* sp.), poniendo en riesgo tanto la biodiversidad como los servicios ecosistémicos que prestan. Como lo evidencia el reporte de Donado (2024) sobre los incendios de enero de 2024, los métodos tradicionales de evaluación basados en recorridos de campo resultan claramente insuficientes para áreas de topografía compleja y acceso restringido, donde la teledetección emerge como la única alternativa

viable para obtener datos sistemáticos y objetivos sobre la extensión e impacto real de las áreas afectadas.

Los incendios forestales han emergido como una de las mayores amenazas para los ecosistemas globales en el Antropoceno. Estudios seminales como los de Swetnam et al. (2016) han demostrado mediante análisis multiescalares cómo la interacción entre el cambio climático y las actividades humanas está alterando fundamentalmente los regímenes históricos de incendios. Estos hallazgos han sido corroborados por investigaciones recientes como las de Safford et al. (2022) en California y Sayedi et al. (2024) a escala global, que evidencian un aumento del 300% en la frecuencia de mega incendios desde 1980, asociado a sequías más prolongadas y cambios en los patrones de uso del suelo.

En el contexto latinoamericano, los trabajos de Armenteras et al. (2021) revelan que aproximadamente el 40% de los incendios en bosques de alta biodiversidad son de origen antropogénico, particularmente asociados a la expansión de la frontera agropecuaria. Esta situación adquiere especial relevancia en ecosistemas críticos como la SNSM, considerado el sistema montañoso litoral más alto del mundo y uno de los *hotspots* de biodiversidad más importantes del planeta (Duran-Izquierdo y Olivero-Verbel, 2021).

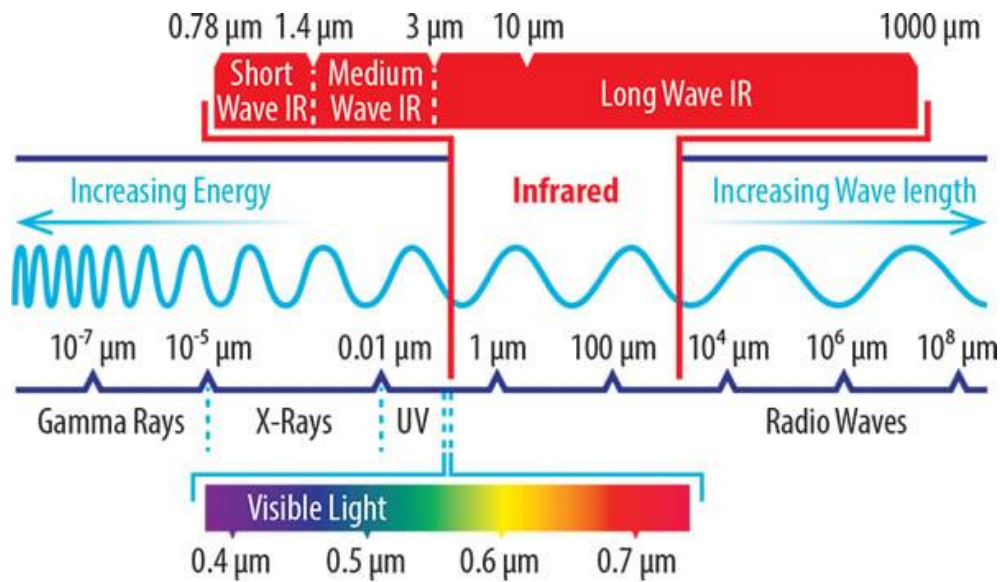
4.2. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es el rango de radiaciones que se extiende desde los rayos cósmicos hasta las ondas de radio (Bava & Dogliotti, 2000) y está constituido por un conjunto de ondas de diferentes características, las cuales se clasifican de acuerdo con su longitud, frecuencia y energía (Salcedo Meza, M, 2012).

Según Bava, J., y Dogliotti, A. (2000) los sensores a bordo de satélites registran, al igual que el ojo humano, radiación electromagnética, que es la radiación transmitida a través del espacio en forma de ondas eléctricas y magnéticas.

Figura 2.

Espectro electromagnético.



Nota: Rango de las radiaciones electromagnéticas. Fuente: Tomado de [Why Infrared? - Ceramicx Infrared Teknolojileri](#)

4.3. Sentinel-2

Según la Agencia Espacial Europea (2015) los Sentinel-2 son una nueva flota de satélites compuestos por un instrumento MSI (Multi Spectral Instrument), diseñada específicamente para proporcionar los abundantes datos e imágenes de que se nutre el programa Copernicus, de la Comisión Europea, y llevan una innovadora cámara multispectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación con diferentes resoluciones espaciales (ver tabla 1), cuatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m y tres bandas con resolución de 60 m. El 23 de junio del 2015 fue el lanzamiento del Sentinel 2A y el 7 de marzo del 2017 del Sentinel 2B.

Tabla 11.*Información de las bandas Sentinel-2.*

Banda	Función	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol	0,443	60
2	Blue	0,490	10
3	Green	0,560	10
4	Red	0,665	10
5	Red Edge	0,705	20
6	Red Edge	0,740	20
7	Red Edge	0,783	20
8	NIR 1	0,842	10
8A	Red Edge	0,865	20
9	Water vapour	0,945	60
10	Cirrus	1,375	60
11	SWIR	1,610	20
12	SWIR	2,190	20

Nota: Datos tomados de Agencia Espacial Europea (2015).

4.4. Evaluación de la Severidad de Incendios

La evaluación de la severidad de incendios forestales se sustenta en un marco teórico que integra tres pilares fundamentales, cada uno aportando perspectivas complementarias para comprender y cuantificar el impacto del fuego en los ecosistemas.

La teoría espectral de la vegetación quemada (i) constituye la base metodológica más consolidada en este campo. Desarrollada inicialmente por Miller y Thode (2007) y perfeccionada por Key y Benson (2006), esta teoría postula que los cambios en las propiedades de reflectancia de la biomasa vegetal posterior al incendio pueden ser cuantificados mediante índices espectrales específicos. El índice dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio), estandarizado por el programa

MTBS (Monitoring Trends in Burn Severity) de Estados Unidos, se ha convertido en el referente global para la clasificación de severidad en cinco niveles diferenciados. Este índice aprovecha la diferencia en reflectancia entre las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo cercano (NIR), particularmente sensibles a los cambios en la cubierta vegetal y la humedad del suelo. Adaptaciones posteriores como el RdNBR (Relativized dNBR), aplicado recientemente por Pacheco Ramos et al. (2025) en la Amazonía, han permitido superar limitaciones en paisajes heterogéneos mediante la normalización por la biomasa preincendio. Complementariamente, la combinación estratégica de bandas espectrales, especialmente SWIR (B11 de Sentinel-2), NIR (B8a) y Rojo (B4), ha demostrado ser particularmente efectiva para la delimitación de áreas quemadas, como lo evidenció Arenas et al. (2016) en ecosistemas mediterráneos. El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), aunque menos específico para incendios que el dNBR, sigue siendo una herramienta valiosa para estimar biomasa residual postincendio, con aplicaciones documentadas por De Santis y Chuvieco (2007) en diversos ecosistemas forestales.

La teoría de respuesta espectral al estrés postincendio (ii), desarrollada y validada por Jodhani et al. (2024), amplía el enfoque espectral tradicional al incorporar variables termodinámicas y de estrés vegetal. Esta teoría explica los patrones diferenciales observados en áreas con distintos grados de afectación mediante el análisis integrado de: (1) la temperatura superficial del terreno (LST), calculada a partir de las bandas térmicas 10 y 11 de Landsat 8, que refleja el aumento de temperatura en áreas desprovistas de cubierta vegetal; (2) los cambios en índices de vegetación como el NDVI y EVI (Enhanced Vegetation Index), sensibles a la pérdida de clorofila; y (3) índices mixtos como LST/EVI, que correlacionan el estrés térmico con el daño vegetal. Esta aproximación multidimensional permite superar limitaciones de los métodos puramente espectrales, particularmente en ecosistemas tropicales donde la rápida recolonización vegetal puede enmascarar el impacto real del incendio.

La teoría de vulnerabilidad socioecosistémica (iii) completa el marco teórico al incorporar factores ecológicos y antropogénicos en la evaluación de severidad. Desarrollada por Duran-Izquierdo y Olivero-Verbel (2021) específicamente para la SNSM, esta teoría integra variables como el tipo de vegetación, la pendiente del terreno, los patrones de uso del suelo y las prácticas agrícolas tradicionales para explicar la distribución espacial de la severidad del fuego. Su particular relevancia para la SNSM radica en su capacidad para analizar la interacción entre los ecosistemas frágiles de alta montaña, las comunidades indígenas con sus sistemas de manejo tradicional, y las presiones de la agricultura comercial y el turismo no regulado. Esta perspectiva holística es esencial para comprender por qué áreas aparentemente similares en términos de cobertura vegetal pueden presentar respuestas radicalmente diferentes ante eventos de incendio.

La conjunción de estas tres teorías proporciona un marco robusto para el análisis de severidad en la SNSM, permitiendo superar las limitaciones de enfoques unidimensionales y ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones en manejo postincendio y restauración ecológica. La integración de métodos espectrales tradicionales (dNBR), termodinámicos (LST) y socioecológicos (vulnerabilidad) representa el estado del arte en la evaluación de impactos por incendios forestales, particularmente en ecosistemas complejos y biodiversos como los presentes en la Sierra Nevada de Santa Marta.

4.5. Avances Metodológicos en la Evaluación de Severidad de Incendios Mediante Teledetección.

La evaluación contemporánea de la severidad de incendios forestales ha experimentado una revolución metodológica gracias al desarrollo de tecnologías de teledetección, que permiten superar las limitaciones de los métodos tradicionales de campo. Estos avances se articulan en dos componentes tecnológicos complementarios que ofrecen perspectivas sinérgicas para el análisis integral del impacto del fuego en los ecosistemas.

4.5.1. Sensores Satelitales Complementarios y sus Aplicaciones

El monitoreo moderno de incendios forestales se beneficia significativamente de la gran oferta de sensores orbitales disponibles, cada uno con características técnicas particulares que los hacen idóneos para aplicaciones específicas:

El satélite Sentinel-2 del programa Copernicus (MSI - MultiSpectral Instrument) representa un avance cualitativo en la observación terrestre, particularmente para la evaluación temprana de severidad postincendio. Como demostró Howe et al. (2022), su combinación de alta resolución espacial (10 m en bandas visibles y NIR, 20 m en SWIR, y 60 m en bandas atmosféricas) con una frecuencia de revisita de 5 días (en conjunto con Sentinel-2B) lo convierte en una herramienta invaluable para la detección oportuna de cambios en la cubierta vegetal. La banda Red Edge (B05 a 705 nm) y las dos bandas SWIR (B11 a 1610 nm y B12 a 2190 nm) son particularmente sensibles a los cambios en la humedad de la vegetación y el contenido de cenizas, permitiendo discriminar con precisión áreas afectadas por el fuego incluso en etapas iniciales de recuperación.

4.5.2. Índices Espectrales Avanzados para Evaluación de Severidad

La comunidad científica ha desarrollado una serie de índices espectrales para cuantificar diversos aspectos de la severidad del fuego, cada uno con fortalezas específicas para diferentes condiciones ecológicas y tipos de vegetación:

El dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio) sigue siendo considerado el "gold standard" para la clasificación de severidad (Key & Benson, 2006), particularmente por su robustez en diversos ecosistemas. Su cálculo se basa en la diferencia entre el NBR preincendio y postincendio, aprovechando la sensibilidad de las bandas NIR (Near Infrared) y SWIR (Short Wave Infrared) a los cambios en la estructura vegetal y contenido de humedad. Ghazali et al. (2025) han validado umbrales específicos para bosques tropicales, estableciendo que valores de dNBR <0.25 corresponden a severidad baja, entre 0.25-0.45 a severidad moderada, y >0.45 a severidad alta.

El BAI (Burn Area Index) desarrollado por Chuvieco (2009) utiliza la reflectancia en la región del rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR) para identificar áreas quemadas con alta precisión en bosques tropicales. Su fórmula matemática está diseñada para maximizar la respuesta espectral en áreas quemadas mientras minimiza falsos positivos en suelos desnudos o rocosos.

Índices más especializados como el NDre2 (Normalized Difference Red Edge 2) han demostrado especial sensibilidad a los cambios en el contenido de clorofila en vegetación parcialmente afectada por incendios (Arellano et al., 2017). Este índice utiliza la banda del borde rojo (Red Edge) disponible en Sentinel-2, que es particularmente útil para detectar estrés vegetal temprano en áreas con daño parcial del dosel.

5. Metodología

5.1. Enfoque Metodológico

Dado que el estudio se basa en el análisis e interpretación de datos existentes sobre los incendios forestales, incluyendo la severidad del fuego y su impacto en la vegetación y el suelo, el enfoque cuantitativo es el más adecuado para alcanzar el objetivo planteado. Este enfoque permitirá una rigurosa recopilación de datos de fuentes secundarias, así como su análisis y procesamiento mediante métodos estadísticos para dar respuesta al problema de investigación.

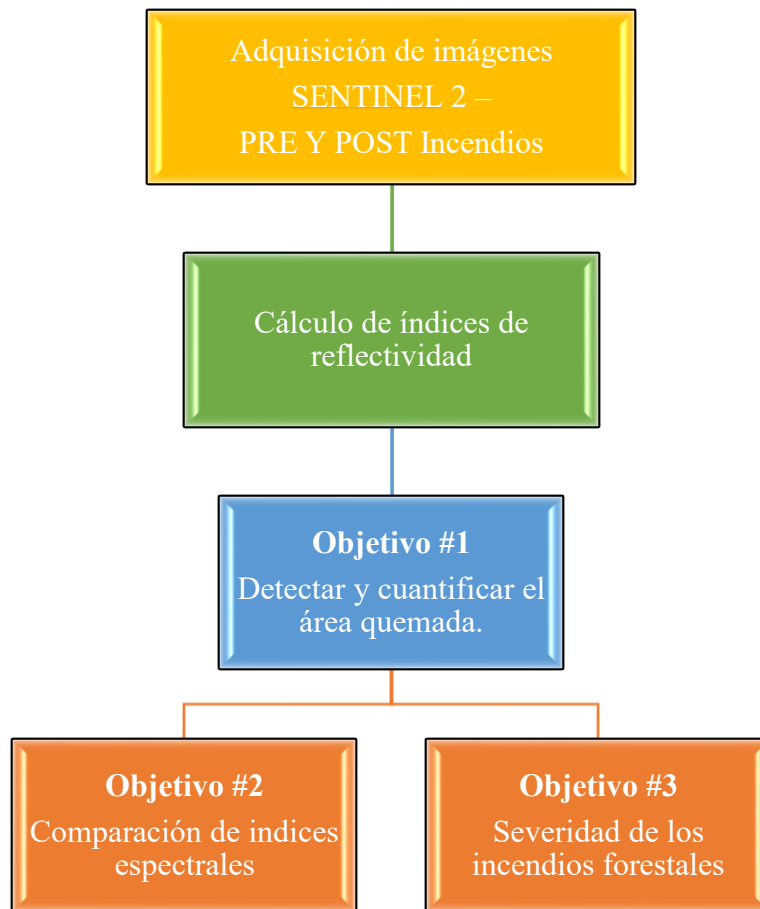
5.2. Tipo de Estudio

La investigación adopta un enfoque metodológico cuantitativo de tipo descriptivo, orientado a la recolección, análisis de datos numéricos y observables relacionados con el cálculo de índices espectrales (reflectividad, temperatura y mixtos) en la SNSM en Colombia. Para ello se procesarán imágenes satelitales Sentinel-2, capturadas pre y post incendio, lo que permitirá evaluar la severidad del incendio forestal ocurrido el 26 y 28 de enero de 2024. La elección de este método se justifica por su capacidad para generar evidencias cuantificables, esenciales para aplicar análisis estadísticos y geoespaciales. Estos permitirán no solo estratificar los niveles de daño en el área afectada, sino también delimitar zonas críticas que requieran intervenciones prioritarias de restauración ecológica.

5.3. Procedimiento

El proceso metodológico para este trabajo se articula en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 33. Diagrama de flujo de la metodología de investigación.



Nota: La figura muestra la metodología para el análisis de severidad de incendios forestales.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1. Detectar y Cuantificar el Área Quemada

Dado que las quemas pueden generar alteraciones significativas en los recursos forestales, resulta necesario determinar las repercusiones físicas de los incendios y su severidad sobre la vegetación y el suelo del área de estudio, con el fin de comprender los niveles de impacto que estos fenómenos ocasionan.

5.3.1.1. Fase 1: Obtención de Datos. Consiste en la búsqueda y descarga de imágenes satelitales del sensor remoto Sentinel-2, obtenido a través de la plataforma Copernicus Browser y Earth Explorer. Estas imágenes son de acceso libre.

Para la adquisición de imágenes, se accedió a la plataforma Copernicus Browser y USGS Earth Explorer donde se cargó el polígono correspondiente al límite de la SNSM. A partir de esta delimitación, se descargaron imágenes satelitales de la situación previa más cercana al incendio (anterior al 26 de enero de 2024) y la segunda, al día posterior más cercana al incendio (después del 31 de enero de 2024). Se seleccionaron imágenes captadas por el sensor Sentinel-2, asegurando que tuvieran un porcentaje de nubosidad igual o inferior al 30 %.

Las imágenes Sentinel-2 están disponibles en forma gratuita a través de la página Copernicus ([Copernicus Browser](#)). Las imágenes adquiridas fueron del 23 de enero de 2024 y del 12 de febrero de 2024.

5.3.1.2. Fase 2: Procesamiento de Imágenes. Actualmente, las imágenes descargadas desde la plataforma Copernicus pueden obtenerse gratuitamente en dos niveles de procesamiento: 1C y 2A. El nivel 1C incluye 13 bandas con resoluciones de 10, 20 y 60 metros, y se proporciona en nivel TOA (Top of Atmosphere), lo que significa que los valores de los píxeles y el aspecto visual de la imagen aún están influenciados por la atmósfera. Para reducir esta influencia, se aplica una corrección atmosférica que permite transformar las imágenes al nivel de procesamiento 2A, el cual utiliza la corrección BOA (Bottom of Atmosphere). Este ajuste modifica los valores de los píxeles, generando imágenes más definidas y claras, eliminando la apariencia de neblina blanquecina que suele afectar la calidad visual.

Las imágenes Sentinel-2 del 23 de enero de 2024 y 12 de febrero de 2024 fueron obtenidas desde la plataforma Copernicus. Las imágenes se descargaron con un nivel de

procesado BOA, por lo cual no fue necesario realizar corrección atmosférica, así como tampoco fue necesario realizar ningún tipo de remuestreo a las bandas.

Una vez descargadas las imágenes, estas fueron importadas al software ArcGIS Pro y proyectadas a través del sistema de coordenadas UTM zona 18N. Posteriormente, se realizó la composición de bandas, lo que permitió llevar a cabo las interpretaciones alineadas con los objetivos establecidos.

5.3.1.3. Fase 3: Delimitación y Cuantificación del Área de Incendio. Una vez obtenida la imagen inmediata posterior al incendio y hecho el recorte (clip) al área de estudio, se identificará el área quemada mediante la combinación de bandas 11, 8a 4 (SWIR, NIR, red). Según Arenas et al. (2016) esta selección permite obtener un contraste óptimo de las áreas quemadas, ya que las bandas en el infrarrojo y el rojo ofrecen una alta sensibilidad a los cambios en la vegetación y en la temperatura. Además, para la delimitación digital del incendio, se emplearon cuatro índices espectrales de vegetación: NBR, NDVI y NDre2, los cuales han sido ampliamente usados para estimar áreas quemadas en grandes incendios forestales, obteniendo muy buenos resultados, ya que proporcionan información en distintos aspectos de la actividad fotosintética después del incendio. Una vez identificada, se delimitará con el trazo del perímetro, con el cual se estimará la superficie afectada.

5.3.2. Comparación de los Índices Espectrales

5.3.2.1. Fase 1: Comparación de los Índices Espectrales. Para llevar a cabo el cálculo de índice de severidad de los incendios se guiará en la metodología propuesta por Key y Benson (2006), la cual se basa principalmente en la utilización de dos imágenes, que corresponden a las disponibles de antes y después del período de incendios en SNSM. Posteriormente, se procede a calcular los índices espectrales propuestos: NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, BAI, SAVI, EVI, dEVI y NDre2.

Para evaluar la severidad de incendios, se utilizarán distintos índices de vegetación y se comparan los índices calculados, obteniendo una aproximación a los distintos niveles de afectación causados por la severidad del fuego (ver tabla 4).

Tabla 2.

Comparativa de índices espectrales.

Índice	Formula Sentinel-2	Ventajas	Desventajas	Referencia bibliográfica
NDVI	$(B_{8A} - B_4) / (B_{8A} + B_4)$	Refleja eficazmente la clorofila y el vigor vegetal	Se satura en coberturas muy densas y es sensible a efectos de suelo y atmósfera.	Blackburn y Milton (1995)
dNDVI	$NDVI_{pre} - NDVI_{post}$	Detección de cambios temporales en vegetación	Requiere imágenes libres de nubes en fechas comparadas	Tanase et al. (2011)
NBR	$(B_{8A} - B_{12}) / (B_{8A} + B_{12})$	Permite diferenciar áreas incendiadas y sanas	Puede confundirse con áreas de suelo sin vegetación	Key y Benson (2006)
dNBR	$NBR_{pre} - NBR_{post}$	Cuantifica la severidad de áreas quemadas en mapeo de incendios	Sensible a diferencias de fechas y nubes. Puede confundir suelos muy oscuros o mojados con áreas quemadas.	Key y Benson (2006) Fornacca et al. (2018)
BAI	$1 / ((0.1 - B_4)^2 + (0.06 + B_{8A})^2)$	Detecta zonas quemadas	Menos eficaz para detectar cambios en zonas donde la vegetación es muy abundante	Huete (1988)
SAVI	$(1 + L) [(B_{8A} - B_4) / (B_{8A} + B_4 + L)]$ L=0,5	Corrige el efecto del suelo en zonas con vegetación escasa o en etapas tempranas de crecimiento.		
EVI	$2.5[(B_{8A} - B_4) / (B_{8A} + 6 \times B_4 - 7.5 \times B_2 + 1)]$	Mejora la precisión en zonas con vegetación muy densa	Sensibilidad a errores de calibración	Gao et al. (2000)
dEVI	$EVI_{pre} - EVI_{post}$	Detecta cambios estacionales de estrés y recuperación.	Sensible a diferencias de fechas y nubes	Zhu et al. (2006)

NDre2	$(B_7 - B_5) / (B_7 + B_5)$	Detección de clorofila y estado nutricional de los cultivos en etapas medias y tardías del crecimiento.	Utiliza una banda específica del espectro del borde rojo ausente en algunos satélites.	Barnes et al. (2000)
-------	-----------------------------	---	--	----------------------

Nota: Adaptado de Cabezas Martín, G. (2020). Análisis de la severidad del incendio forestal en el Parque Nacional Sierra La Macarena Meta-Colombia, usando Sentinel-2 y Landsat 8 Oli en el año 2018.

5.3.3. Severidad de los Incendios Forestales

5.3.3.1. Fase 1: Análisis de la Severidad de los Incendios Forestales. Según Blackburn y Milton, (1995) el NDVI permite estimar la biomasa verde presente sin discriminar especies vegetales. Adicionalmente, Duncan et al. (1993), establecen que este índice resulta eficaz para cuantificar la cobertura vegetal a escala espacial amplia. Su amplia aplicación en estudios de incendios se debe a la sólida correlación entre la severidad del fuego y la reducción de biomasa (De Santis & Chuvieco, 2007). Los valores obtenidos pueden clasificarse según niveles de actividad fotosintética residual (ver tabla 5).

Tabla 3.

Actividad fotosintética según índice NDVI.

Actividad Fotosintética	Rango
Nula	<0
Muy baja	0 – 0,1
Baja	0,1 – 0,2
Media	0,2 – 0,3
Media - alta	0,3 – 0,4
Alta	0,4 – 0,6
Muy alta	>0,6

Nota: Datos tomados De Santis y Chuvieco (2007).

Con el propósito de evaluar las áreas quemadas, se puede comparar el NBR de dos imágenes (pre y postincendio) mediante una calculadora ráster. Este método permite evitar tomar en cuenta aquellas superficies que no corresponden a áreas quemadas; sin embargo, poseen un bajo NBR, como suelos desnudos o caminos y ciertas superficies brillantes. De este modo solo permite un análisis de áreas que han cambiado tras la ocurrencia del incendio. A este índice se le denomina

dNBR. Según la propuesta de USGS se utiliza el índice dNBR para clasificar la severidad del fuego en 7 categorías; las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Categorización de severidad para dNBR.

Nivel de severidad	Valores del dNBR
Regeneración alta	-5,000 a -0,251
Regeneración baja	-0,250 a -0.101
No quemado	-0,100 a 0,099
Leve	0,100 a 0,269
Leve a moderado	0,270 a 0,439
Moderado a severo	0,440 a 0,659
Severo	0,660 a 1,300

Nota: Datos tomados de USGS para los niveles de severidad de incendios forestales.

6. Resultados

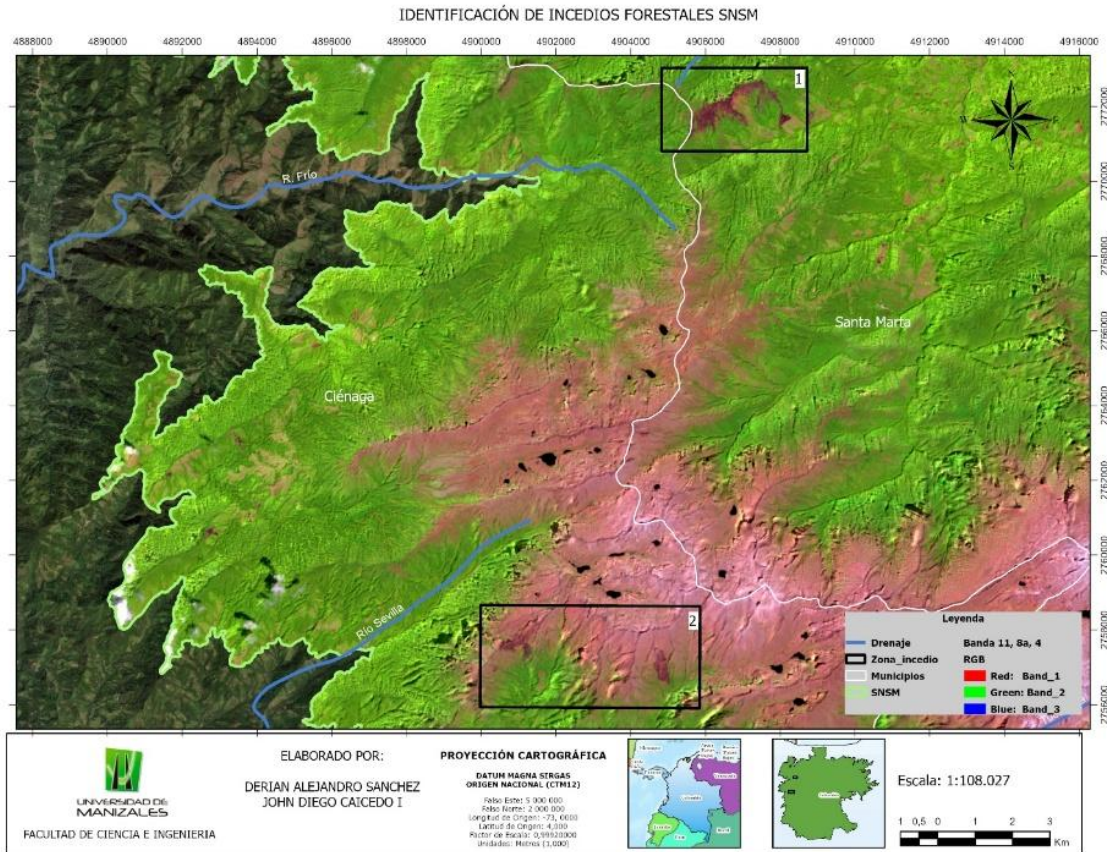
Los resultados obtenidos del análisis de severidad de los incendios forestales registrados el 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM, se presentan de acuerdo con los 3 objetivos específicos. En el primer objetivo se realizó la cartografía del impacto del fuego en la vegetación y suelo por los incendios forestales empleando los índices de reflectividad, térmicos y combinados; en el segundo objetivo, un análisis de los resultados obtenidos por el sensor satelital; y en el tercer objetivo, se calculó la severidad del fuego.

6.1. Cartografía del Impacto del Fuego en la Vegetación y Suelo

La combinación estratégica de bandas espectrales B11 (SWIR), B8A (NIR) y B4 (Rojo) de Sentinel-2 permitió identificar claramente la cicatriz dejada por los incendios en la imagen del 12 de febrero de 2024 (Figura 5). Se evidencia que los incendios forestales se concentraron en el sector oeste de la SNSM, específicamente en los municipios de Santa Marta y Ciénaga del departamento del Magdalena. Esta zona se caracteriza por ser una transición entre bosques andinos y áreas con influencia antrópica.

Figura 4.

Incendios forestales del 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM.



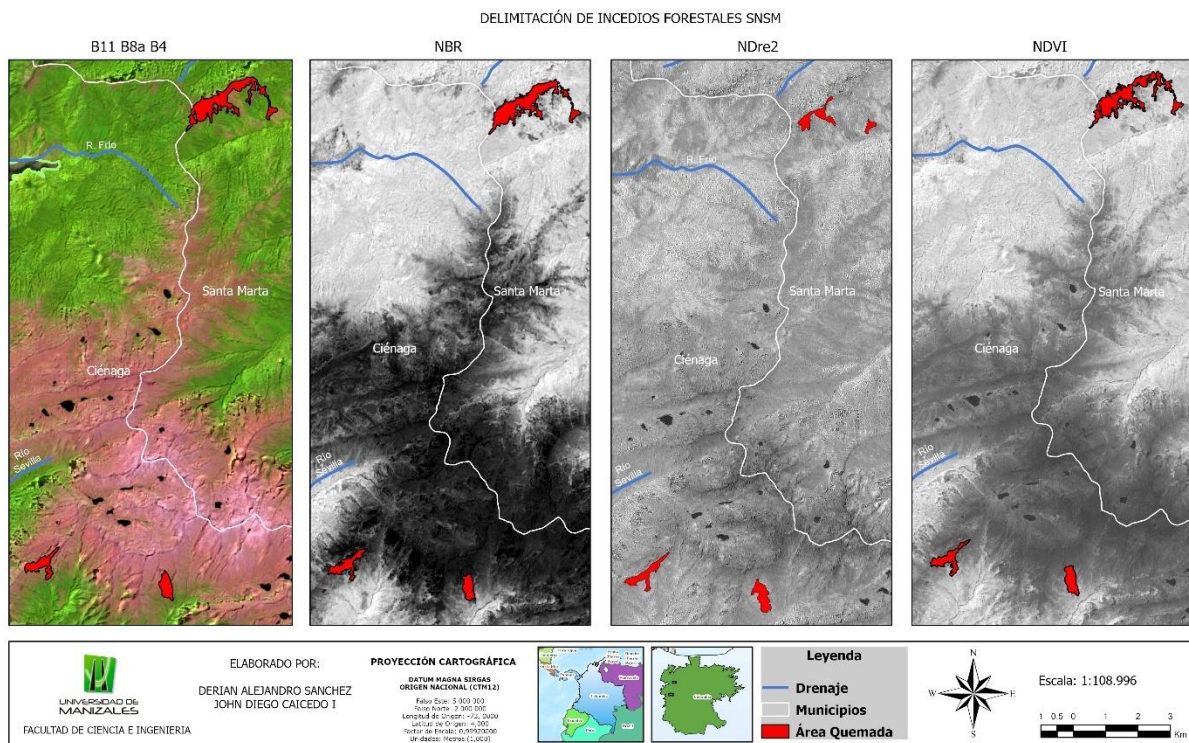
Nota: El mapa representa la identificación de los incendios forestales del 26 y 28 de enero de 2024 en la SNSM mediante la combinación de bandas B11, B8A, B4 de Sentinel-2. Fuente: Elaboración propia.

La estimación del área total afectada se realizó integrando la combinación de bandas antes mencionada con los índices NBR, NDVI y NDre2. El área total delimitada y afectada fue de 210,95 hectáreas (Figura 6). Este valor supera en aproximadamente 38 hectáreas el reporte inicial de 172 hectáreas proporcionado por medios oficiales (Radio Nacional de Colombia, 2024). La diferencia

se atribuye a la capacidad de los índices espectrales para detectar áreas con quemaduras parciales o de baja severidad, que pueden pasar desapercibidas en evaluaciones visuales rápidas en campo.

Figura 5.

Mapa de delimitación del impacto del fuego en la vegetación y suelo.

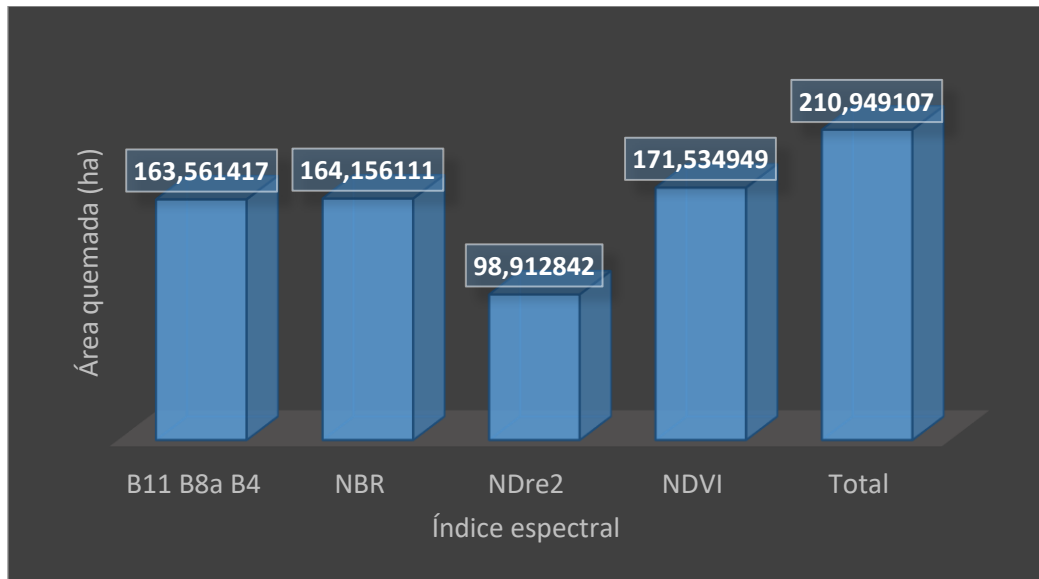


Nota: El mapa representa la delimitación del área afectada por los incendios forestales de acuerdo con los índices espectrales NBR, NDre2, NDVI y la combinación de bandas B11, B8a, B4. Fuente: Elaboración propia.

El área estimada del impacto del fuego varió significativamente según la metodología empleada para la delimitación o el índice espectral (Figura 7). Dicha variación no constituye un error, sino que más bien evidencia cómo cada índice tiene un enfoque diferencial entre los componentes y niveles del daño.

Figura 6.

Área quemada según los índices NBR, NDVI, NDre2 y banda espectral (11, 8a y 4)



Nota: La gráfica muestra la estimación del área quemada a partir del análisis de índices espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

El NDre2 es altamente sensible a los cambios en el contenido de clorofila y la estructura interna de las hojas. Que sea el índice que reporta el área más pequeña sugiere que aproximadamente 99 hectáreas sufrieron una alteración bioquímica severa, donde el fuego consumió o mató el follaje. La combinación de bandas B11, B8a y B4, junto con el NBR, es sensible a la pérdida de humedad en la vegetación y al carbón y cenizas depositadas en el suelo. La coincidencia entre estos dos métodos podría indicar que el impacto físico del fuego tiene un anillo de afectación moderada, donde parte de la vegetación se afectó, pero no se destruyó por completo. El NDVI tiende a ser un índice más generalista, midiendo el “verdor” o vigor vegetal. Que sea el índice que reporta un área mayor, podría deberse a la susceptibilidad de captar áreas con estrés hídrico postincendio, que podrían no ser consumidas por las llamas en su totalidad.

6.2. Comparación de los Índices Espectrales

El desempeño de los índices espectrales con imágenes Sentinel-2 permitió categorizar su efectividad para resaltar la cicatriz del incendio. Los índices NBR, NDVI, SAVI y BAI, muestran un buen contraste entre las áreas quemadas y la vegetación sana.

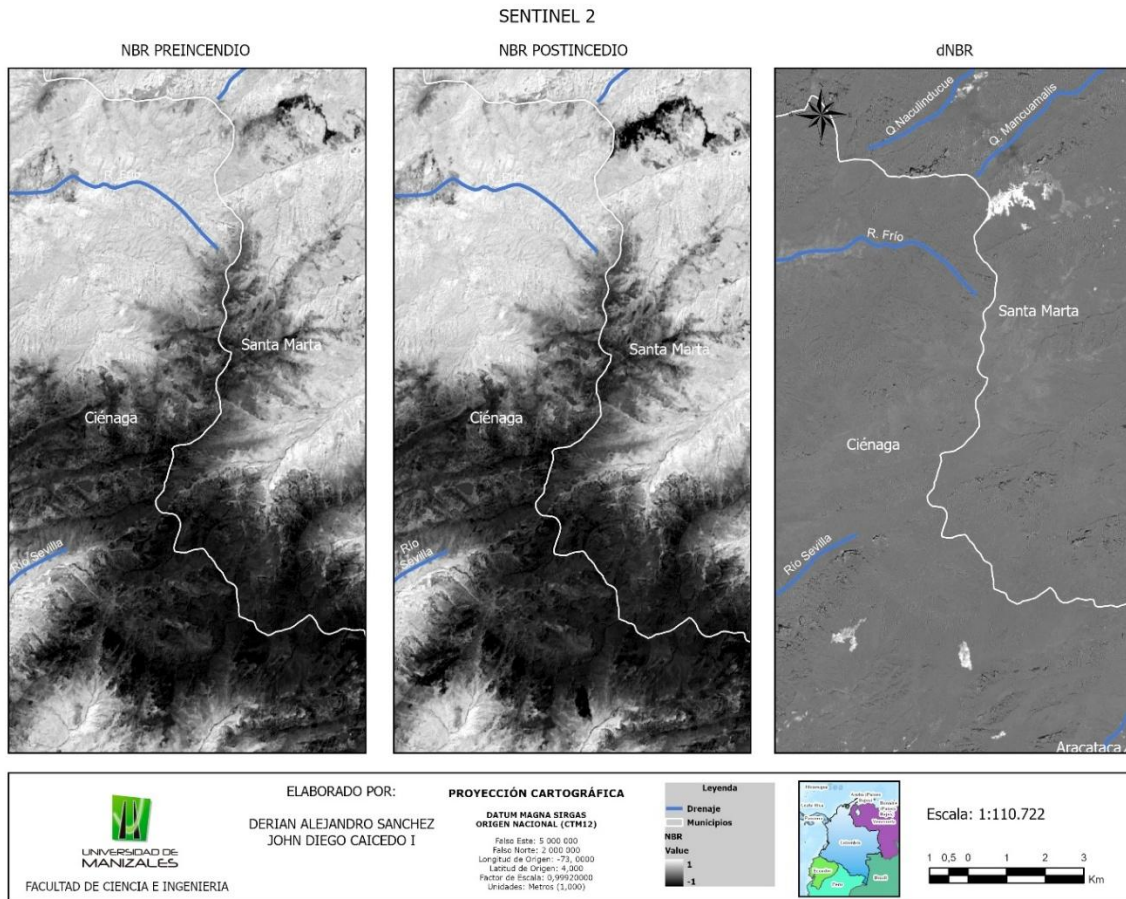
Por su parte, los índices EVI y NDre2, diseñados para corregir influencias atmosféricas, mostraron una sensibilidad menor al daño por fuego, en este contexto específico, mostrando una menor diferenciación en la marca ocasionada por el incendio en la vegetación.

6.2.1. Sentinel-2

6.2.1.1. NBR y dNBR. Este índice ofrece una discriminación mucho más nítida de los incendios forestales, mostrando una mayor discriminación de áreas quemadas, sin embargo, también se encontró que visualmente se evidenciaban algunas confusiones producidas por pequeñas láminas de agua (ver figura 8). De acuerdo con la superficie total estimada (210,95 ha), después de los incendios forestales, 163,6 ha (77,5%) presentan valores negativos, indicando una afectación en la cobertura vegetal y el suelo, mientras que 47,4 ha (22,5%) conservaron los valores negativos de NBR, sin mucha afectación en la cobertura vegetal. (Ver figura 8).

Figura 7.

Mapa de NBR y variación temporal del índice entre dos fechas (dNBR)

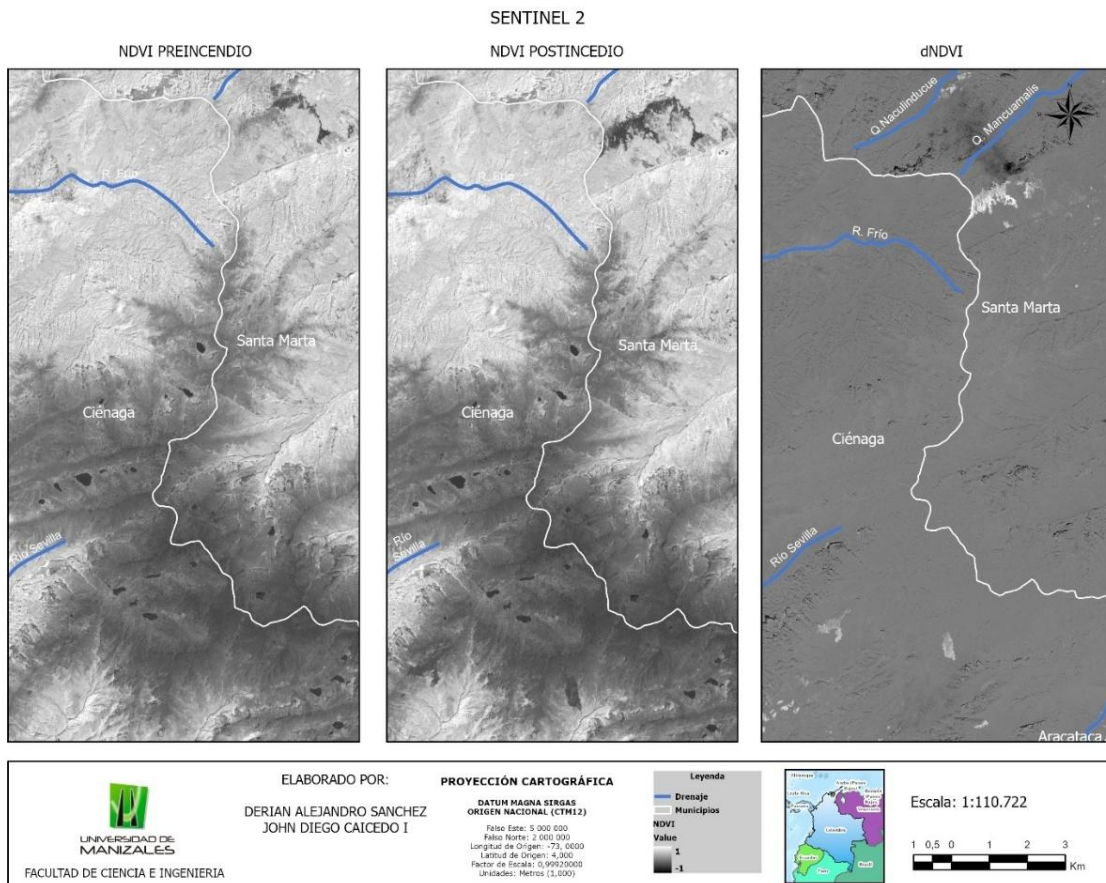


Nota: La figura muestra en tono blanco las diferencias detectadas entre las imágenes pre y postincendio, lo que permite identificar la severidad estimada mediante el índice dNBR. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.2. NDVI y dNDVI. Antes del incendio, de acuerdo con la superficie total estimada (210,95 ha) el 100 % del polígono presentaba valores de NDVI > 0, después del incendio, solo 112,0 ha (53,1 %) del área mantiene valores positivos. Por lo tanto, 98,91 ha restantes (46,9 %) perdieron la señal positiva de NDVI y mostraron pérdida de vigor en la vegetación. El NDVI resultó útil para cuantificar la biomasa residual, aunque menos preciso que el dNBR (ver figura 9).

Figura 8.

Mapa de NDVI y variación temporal del índice entre dos fechas (dNDVI)

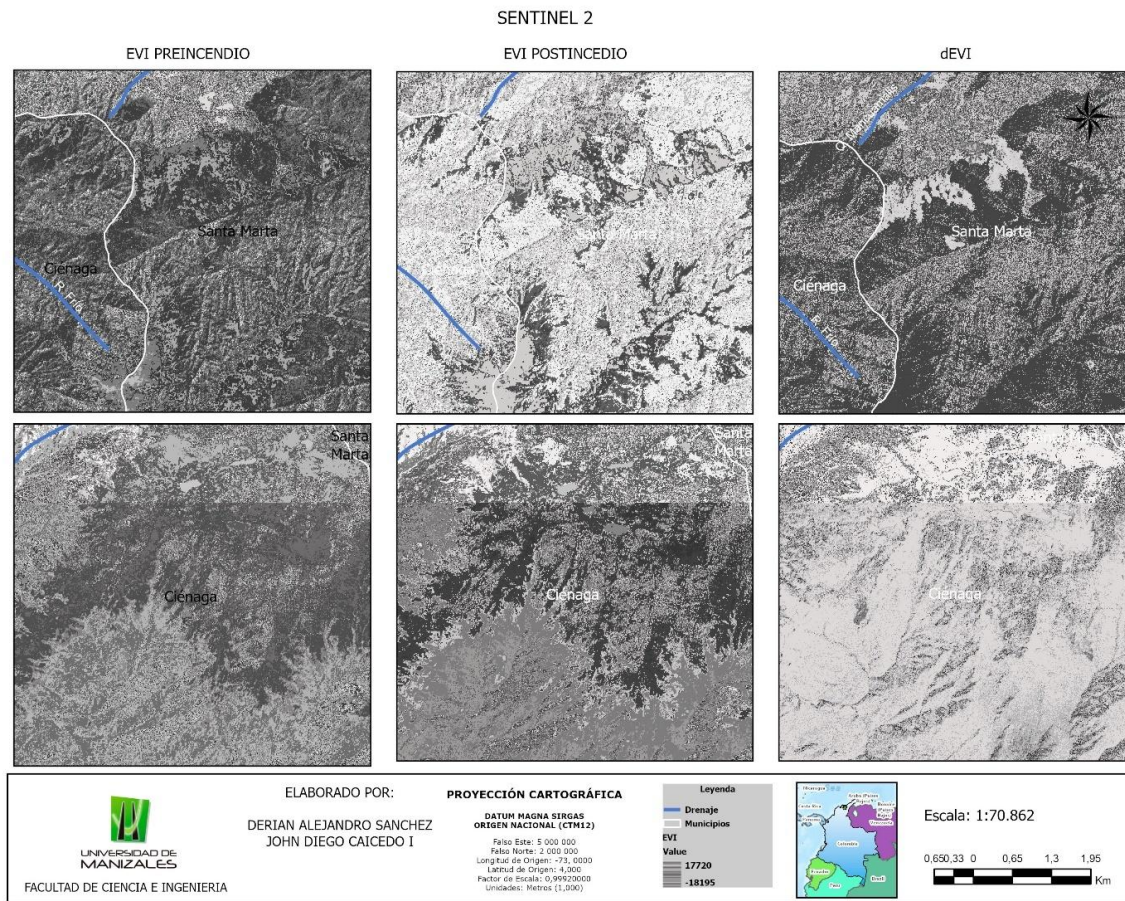


Nota: La figura muestra en tono blanco las diferencias detectadas entre las imágenes pre y postincendio, lo que permite identificar la severidad estimada mediante el índice dNDVI. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.3. EVI y dEVI. Este indicador permite identificar valores negativos, reflejando la pérdida de cobertura vegetal y estrés en la vegetación sobreviviente; los valores cercanos a cero no reflejan cambios significativos.

Figura 9.

Mapa de EVI y variación temporal del índice entre dos fechas (dEVI)



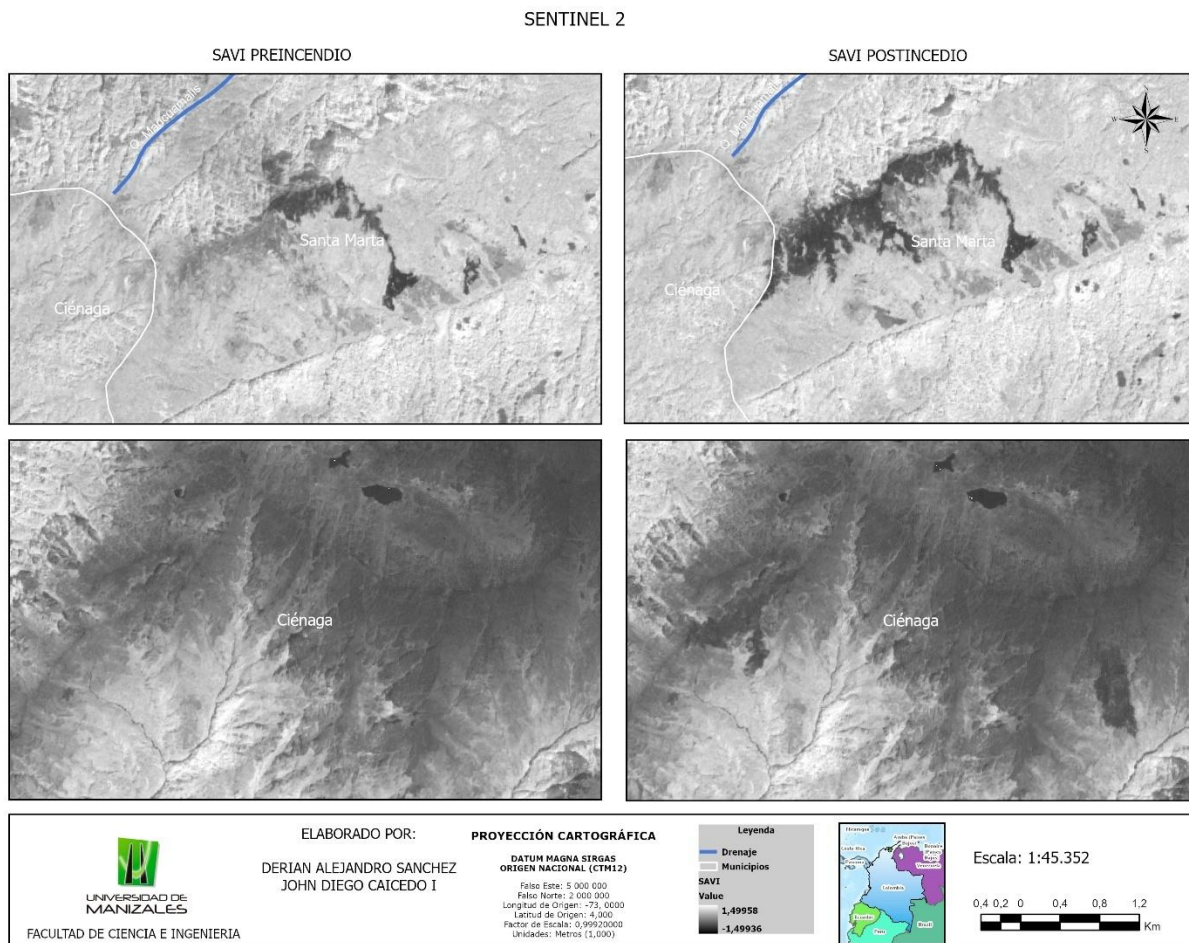
Nota: La figura presenta en tono blanco las diferencias detectadas entre las imágenes pre y postincendio correspondientes al evento ocurrido en el municipio de Santa Marta. Esta representación permite identificar la severidad estimada del daño mediante el índice dNBR. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.4. SAVI. El índice corrigió la influencia del suelo en áreas con vegetación rala.

Se observó que entre un 40–45% del polígono perdió señal positiva, aumentando los tonos oscuros, indicando pérdida de vigor vegetal, mayor proporción de suelo expuesto y residuos de incendios forestales.

Figura 10.

Mapa de SAVI preincendio y postincendio.

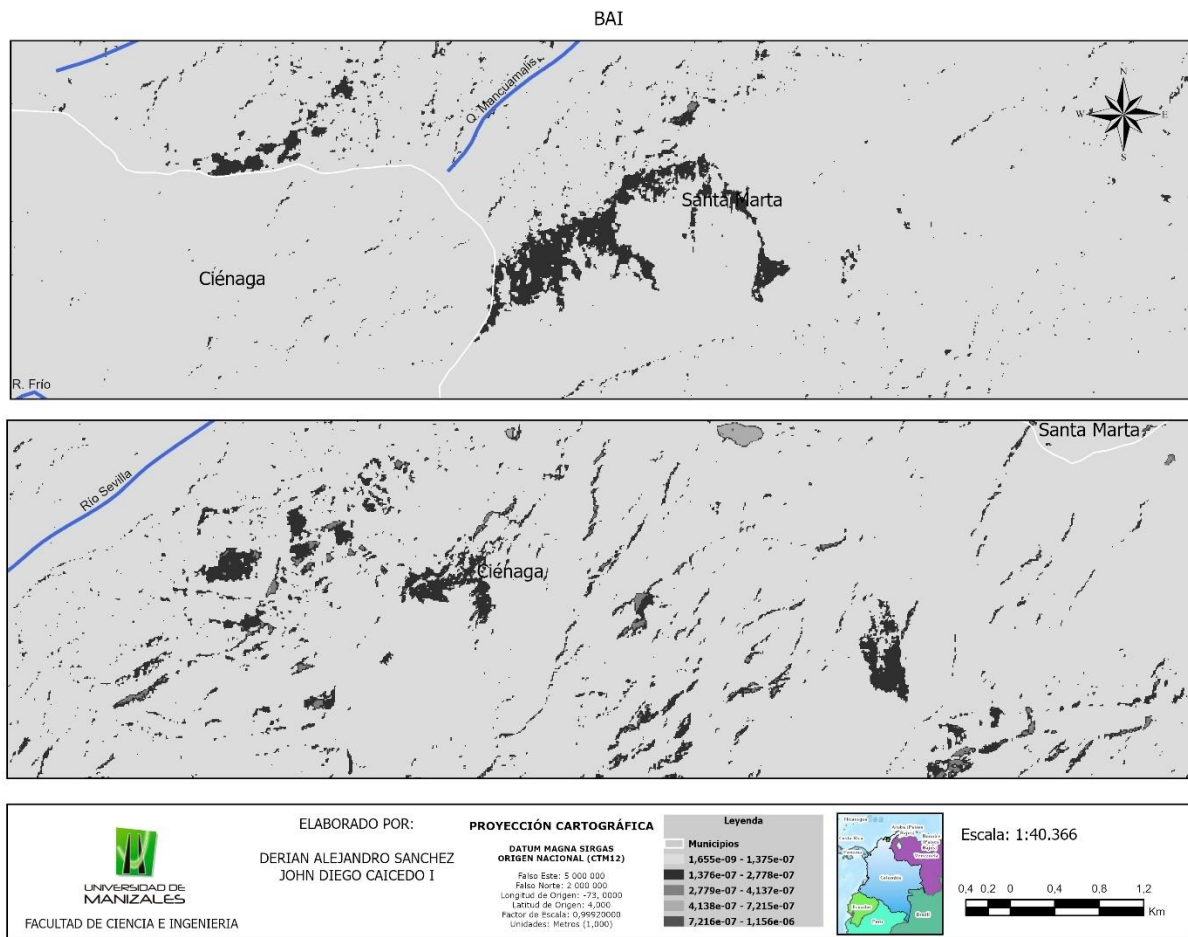


Nota: La figura muestra el aumento de los tonos oscuros, lo que permite identificar la severidad estimada mediante el índice SAVI. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.5. BAI. Resaltó con precisión las cicatrices de fuego, aunque presentó confusión en suelos oscuros y cuerpos de agua someros. Aun así, permitió corroborar la extensión de la cicatriz detectada por NBR.

Figura 11.

Mapa de BAI postincendio

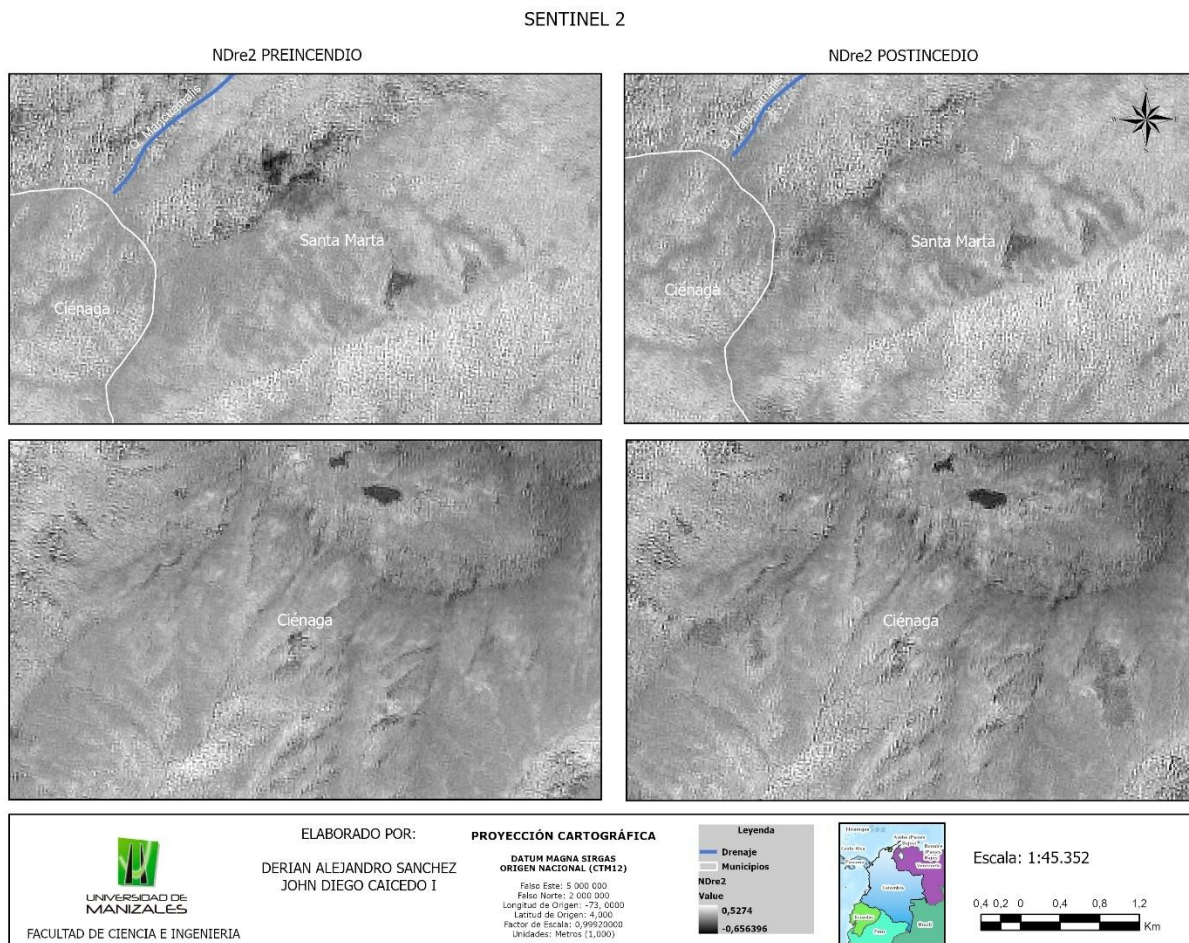


Nota: La figura representa en tonos oscuros las áreas de vegetación quemada; no obstante, estos tonos pueden generar ambigüedad al coincidir visualmente con cuerpos de agua someros. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.6. NDre2. Este índice es especialmente sensible a la pérdida de clorofila en vegetación parcialmente afectada, el 100 % del área (210,95 ha) presentaba valores de NDre2 > 0, después de los incendios; solo el 22,2 % mantiene valores positivos, es decir, 46,79 ha. Por lo tanto, 164,16 ha (77,8 %) restantes perdieron la señal positiva de NDre2, indicando un impacto del fuego.

Figura 12.

Mapa de NDre2 preincendio y postincendio



Nota: La figura representa el aumento de los tonos oscuros las áreas de vegetación quemada.

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Severidad de los incendios forestales

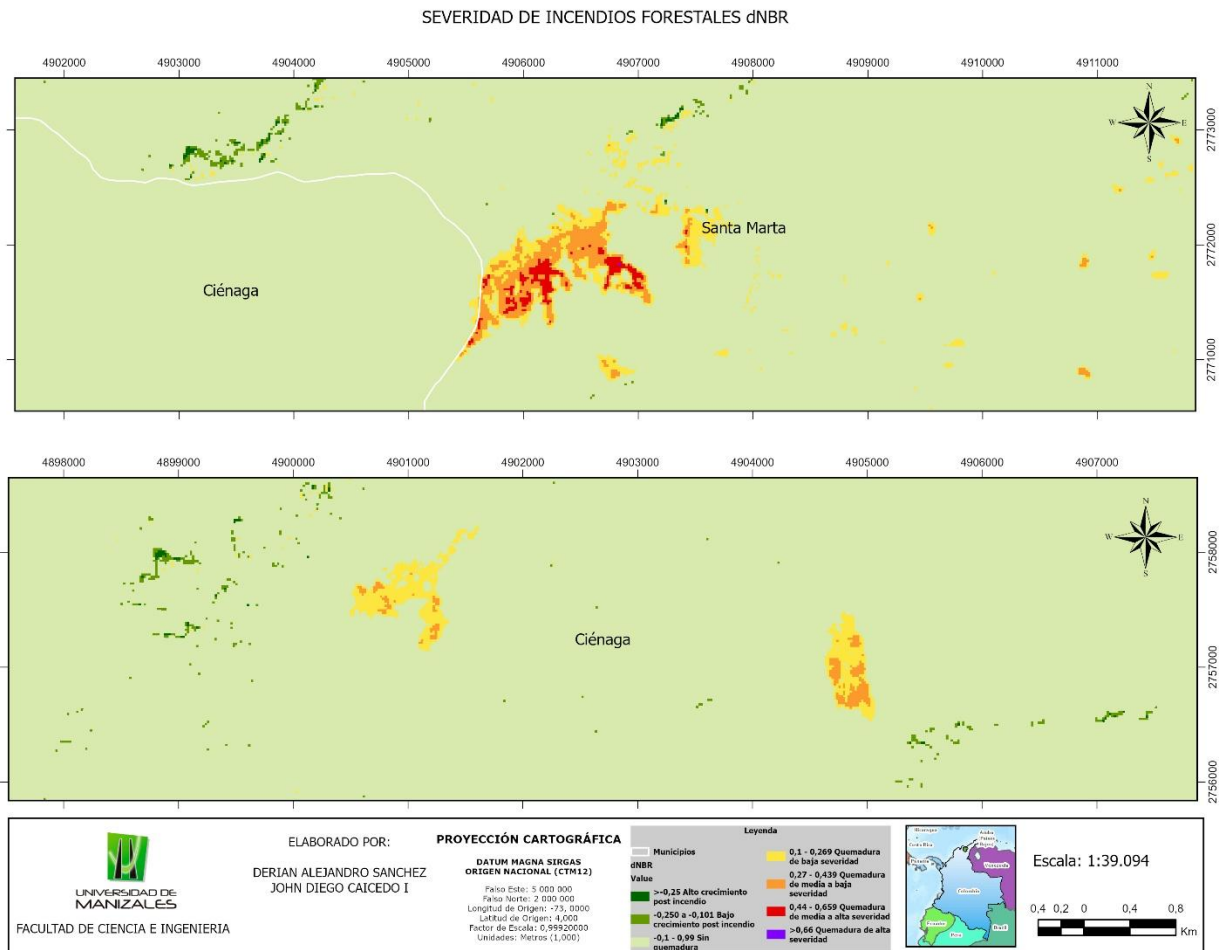
Se elaboró el mapa de severidad, teniendo en cuenta los análisis realizados sobre las imágenes satelitales Sentinel-2, utilizando el índice dNBR. Dicho índice es considerado el más adecuado por el detalle que ofrece y la confiabilidad de los incendios forestales ocurridos. Este análisis permitió identificar el área afectada en tres categorías de severidad (ver figura 14):

- Moderado a severo (≈ 10 ha; 4,76%): áreas con mayor afectación e intensidad del fuego en relación con la gravedad de la quema que sugieren riesgo de erosión y pérdida de suelo.
- Leve a moderado (≈ 40 ha; 19,05%): zonas con pérdida parcial de vigor, pero con potencial de regeneración natural.
- Leve (≈ 160 ha; 76,19%): áreas con mínima afectación, donde la vegetación conserva capacidad de resiliencia.

Las zonas con severidad leve (amarillo) y leve a moderado (naranja claro) forman un anillo alrededor del área moderada a severa, sugiriendo que el fuego perdió intensidad al avanzar hacia zonas con menor combustible.

Figura 13.

Mapa de severidad de los incendios forestales basado en el índice dNBR.



Nota: La figura muestra las tres categorías de severidad de los incendios forestales, destacándose una mayor severidad en el incendio ocurrido en el municipio de Santa Marta. Fuente: Elaboración propia.

7. Discusión

Los resultados de este trabajo permiten abordar algunos aspectos de interés en relación con los análisis de severidad de incendios, particularmente con los ocurridos en enero de 2024 en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). Se puede afirmar que los métodos basados en teledetección son una herramienta efectiva para cuantificar los efectos negativos que causan los incendios sobre la vegetación en ecosistemas tropicales de alta montaña. El índice dNBR demostró ser el más sensible para discriminar las áreas afectadas por incendios forestales, coincidiendo con lo mencionado por Key y Benson (2006) y Howe et al. (2022).

La delimitación del área afectada, estimada en aproximadamente 210 hectáreas, supera las 172 hectáreas reportadas inicialmente por medios oficiales (Radio Nacional de Colombia, 2024), lo que sugiere que la teledetección permite una cuantificación más precisa que los métodos tradicionales de evaluación en campo, especialmente en una topografía compleja como lo es la SNSM. El contraste de los datos estimados sugiere implementar metodologías basadas en sensores remotos para una evaluación más objetiva de los desastres naturales, tal como lo plantearon Duran-Izquierdo y Olivero-Verbel (2021).

El índice dNBR demostró efectividad para discriminar los niveles de severidad del incendio, confirmando su utilidad como indicador estandarizado (Key & Benson, 2006). La clasificación de severidad reveló que el 4,86% del área afectada (10 ha) presentó niveles de severidad moderada a severa, lo que implica impactos significativos en la estructura de la vegetación y el suelo, con probable afectación de procesos ecológicos esenciales como la retención de agua y la regeneración natural, aspectos críticos en un ecosistema de páramo como el afectado (Borrelli et al., 2015).

Respecto a los índices espectrales evaluados, se confirmó que no todos presentan la misma sensibilidad para detectar cambios postincendio en ecosistemas tropicales de montaña. Mientras

que NBR, NDVI y BAI mostraron una clara respuesta espectral en las áreas quemadas, los índices EVI y NDre2 presentaron menor capacidad discriminadora, posiblemente debido a las características específicas de la vegetación afectada y las condiciones ambientales posteriores al incendio. Esta variabilidad en el desempeño de los índices resalta la importancia de realizar validaciones locales antes de implementar metodologías estandarizadas, tal como lo sugirieron Ghazali et al. (2025) para bosques tropicales.

La concentración de los incendios en el sector occidental de la SNSM, específicamente en los municipios de Santa Marta y Ciénaga, evidencia la vulnerabilidad de estas zonas a eventos recurrentes de incendios, probablemente asociada a la combinación de factores antropogénicos (presión por expansión agrícola y turística) y condiciones topoclimáticas favorables para la propagación del fuego, tal como lo documentaron Armenteras et al. (2021) para la región.

Finalmente, los resultados obtenidos subrayan la urgencia de implementar sistemas de monitoreo continuo basados en teledetección para la SNSM, que permitan no solo evaluar los impactos de incendios pasados, sino también identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica y la prevención de futuros eventos.

8. Conclusiones

- La teledetección es una herramienta eficaz para evaluar la severidad de los incendios forestales en ecosistemas complejos y de difícil acceso como la SNSM. La estimación del área afectada (210 ha) fue más precisa que los reportes iniciales, demostrando la utilidad de los índices espectrales para una cuantificación más certera.
- El índice dNBR mostró un desempeño en la clasificación de la severidad, permitiendo identificar que la mayor parte del área quemada (76,19%) presentó daños leves, mientras que un 19,05% registró afectación leve a moderada y un 4,76% daños moderados a severos. Estos resultados reflejan un impacto significativo sobre la vegetación y el suelo, con potencial afectación de servicios ecosistémicos críticos, como la regulación hídrica.
- No todos los índices espectrales son igualmente efectivos en el contexto de la SNSM. Índices como NBR, NDVI y BAI fueron los más sensibles para detectar cambios postincendio, mientras que EVI y NDre2 mostraron limitaciones, lo que sugiere la necesidad de adaptar las metodologías a las condiciones ecológicas particulares.
- La localización de los incendios en el flanco occidental de la SNSM confirma la alta vulnerabilidad de esta zona, donde confluyen presiones antrópicas y factores ambientales, requiriendo atención prioritaria para estrategias de manejo del fuego y restauración.
- La metodología implementada es replicable para otros ecosistemas tropicales montañosos, ofreciendo un marco amplio para la evaluación rápida y objetiva de impactos por incendios forestales que puede apoyar la toma de decisiones en gestión postincendio y restauración ecológica.

9. Recomendaciones

- Implementar un sistema de monitoreo continuo basado en teledetección para la alerta temprana y evaluación rápida de incendios forestales en la SNSM. Así como, establecer programas de restauración ecológica en las áreas identificadas con severidad moderada a severa.
- Diseñar estrategias para la prevención y el manejo del fuego en zonas con mayor recurrencia de incendios forestales, integrando el conocimiento ancestral de las comunidades indígenas.
- Evaluar la recuperación postincendio mediante monitoreo multitemporal de imágenes satelitales para determinar la tasa de regeneración natural de la vegetación en el área afectada, validando en campo los resultados de la teledetección. Para estudios posteriores, incorporar variables adicionales como pendiente, uso del suelo, topográficas y climatológicas, que permitan identificar áreas de mayor riesgo en la SNSM mediante el análisis de susceptibilidad de incendios forestales.
- Continuar con estudios de severidad de incendios forestales integrando los índices espectrales térmicos y mixtos de las imágenes satelitales del sensor Landsat 8 OLI/TIRS para obtener un mejor análisis del comportamiento del fuego.

Referencias

Alkhatib, R., Sahwan, W., Alkhatieb, A., y Schütt, B. (2023). A brief review of machine learning algorithms in forest fires science. *Applied Sciences*, 13(14), 8275. <https://doi.org/10.3390/app13148275>

Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D. 2017. *Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. Revista de Teledetección*, 49, 49-61. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>

Arenas, J. M., et al. (2016). Evaluation of spectral indices for estimating burn severity in semiarid Mediterranean environments. *International Journal of Wildland Fire*, 25(2), 147-158. <https://doi.org/10.1071/WF14153>

Armenteras, D., González, T. M., y Retana, J. (2021). *Forest fire danger trends in the Colombian Andes. Environmental Research Letters*, 16(7), 074007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0f2a>

Armenteras, D., Dávalos, L. M., Barreto, J. S., Miranda, A., Hernández-Moreno, A., Zamorano-Elgueta, C., ... y Retana, J. (2021). Fire-induced loss of the world's most biodiverse forests in Latin America. *Science Advances*, 7(33), eabd3357. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3357>

Bahramvash Shams, S., Boehnert, J., y Wilhelmi, O. (2025). Assessing the Impact of Conservation Practices on Post-Wildfire Recovery of Evergreen and Conifer Forests Using Remote Sensing Data. *Fire*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/fire8030092>

Bava, J., y Dogliotti, A. (2000). Teledetección con Imágenes Satelitales: Generalidades. *Grupo de Teledetección IAFE. Argentina.*

Blackburn G., y Milton E. (1995). Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *International Journal of Remote Sensing* (16), 709-720.

Borrelli, P., Armenteras, D., Panagos, P., Modugno, S., y Schütt, B. (2015). The implications of fire management in the Andean paramo: A preliminary assessment using satellite remote sensing. *Remote Sensing*, 7(9), 11061–11082. <https://doi.org/10.3390/rs70911061>

Boudjemline, F. (2021). *Mapping and Assessing Forest Fire Severity Using Remote Sensing Indices: A Case Study of Tizi Ouzou (Algeria), Summer 2021*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5252499>

Chuvieco, E. 2009. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems. Alcalá de Henares, Spain: Springer. 257 pp.* <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4>

Cisneros Vaca, C., Calahorrano, J., y Manzano, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia forestal*, 27(1). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2024.1>

De Santis, A., y Chuvieco, E. (2007). Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.022>

Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. 2004. Statistical analysis of fire frequency models for Catalonia (NE Spain, 1975-1998) based on fire scar maps from Landsat MSS data. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 89-99. <https://doi.org/10.1071/WF0205>.

Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. D. L. A., Mari, N., y Verón, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Revista Ecosistemas*, 17(3).

Donado, R. F. (2024, 7 junio). *Continúa activo el incendio de la Sierra Nevada en Ciénaga, Magdalena. RCN Radio*. <https://www.rcnradio.com/colombia/caribe/continua-activo-el-incendio-de-la-sierra-nevada-en-cienaga-magdalena>

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... y Bargellini, P. (2012). *Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25-36*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

Duncan J., Stow D., Fanklin J., y Hope J. (1993). Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing (14), 3395-3416*.

Duran-Izquierdo, M., y Olivero-Verbel, J. (2021). Vulnerability assessment of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: World's most irreplaceable nature reserve. *Global Ecology and Conservation, 28, e01592*. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01592>

FAO. (2020). *State of the World's Forests 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ghazali, N. N., Saraf, N. M., Rasam, A. R. A., Othman, A. N., Salleh, S. A., y Saad, N. M. (2025). Forest Fire Severity Level Using dNBR Spectral Index. *Revue Internationale de Géomatique, 34(1), 89-101*. <https://doi.org/10.32604/rig.2025.042001>

González, F., Morante-Carballo, F., González, A., Bravo-Montero, L., Benavidez-Silva, C., y Tedim, F. (2024). Assessment of Forest Fire Severity for a Management Conceptual Model: Case Study in Vilcabamba, Ecuador. *Forests, 15(12), 2210*. <https://doi.org/10.3390/f15122210>

Greenbaum, N., Tessler, N., y Wittenberg, L. (2016). Vegetation cover and species richness after recurrent forest fires in the Eastern Mediterranean ecosystem of Mount Carmel, Israel. *The Science of Total Environment, 572*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.113>

Howe, A. A., Parks, S. A., Harvey, B. J., Saberi, S. J., Lutz, J. A., y Yocom, L. L. (2022). Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for burn severity mapping in Western North America. *Remote Sensing*, 14(20), 5249. <https://doi.org/10.3390/rs14205249>

Hudak, A.T., Morgan, P., Bobbitt, M.J., Smith, A.M.S., Lewis, S.A., Lentile, L.B., Robichaud, P.R., Clark, J.T., McKinley, R.A. 2007. *The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects*. *Fire Ecology*, 3, 64-90. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301064>.

Humboldt, A. (2021). *Informe sobre el estado de los ecosistemas de alta montaña en Colombia*. Instituto Humboldt.

Humboldt, A. (2022). *Catálogo de especies endémicas de la Sierra Nevada de Santa Marta*. Instituto Humboldt.

IDEAM. (2021). *Informe anual de deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2023). *Reporte anual de incendios forestales en Colombia 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Jiménez, A. M., Urrego, L. E., y Toro, L. J. (2016). Evaluación del comportamiento de incendios de la vegetación en el norte de Antioquia (Colombia): Análisis del paisaje. *Colombia forestal*, 19(2), 161–180. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.03>

Jodhani, K. H., Patel, H., Soni, U., Patel, R., Valodara, B., Gupta, N., ... y Omar, P. J. (2024). Assessment of forest fire severity and land surface temperature using Google Earth Engine: A case study of Gujarat State, India. *Fire Ecology*, 20(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00258-y>

Key, C. H., y Benson, N. C. (2006). Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *USDA Forest Service*.

Martin, M.P. y Chuvieco, E. Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y Landsat TM. *Revista de Teledetección*, 2001, N° 16, p. 57-64.

McDonald, E., Webb, E. A., y Dech, J. P. (2025). Oxygen isotope values of charred tree bark as an indicator of forest fire severity. *Trees, Forests and People*, 100786. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100786>

Mehmood, K., Anees, S. A., Luo, M., Akram, M., Zubair, M., Khan, K. A., y Khan, W. R. (2024). Assessing Chilgoza Pine (*Pinus Gerardiana*) forest fire severity: Remote sensing analysis, correlations, and predictive modeling for enhanced management strategies. *Trees, Forests and People*, 16, 100521. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100521>

Miller, J. D., y Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Tanase, M. A., y De la Riva, J. (2014). Forest fire severity assessment using ALS data in a Mediterranean environment. *Remote Sensing*, 6(5), 4240–4265. <https://doi.org/10.3390/rs6054240>

Morgan, P., Keane, R. E., Dillon, G. K., Jain, T. B., Hudak, A. T., Karau, E. C., Strand, E. K. 2014. Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 23(8), 1045-1060. <https://doi.org/10.1071/WF13058>

O'Connor, C. D., Falk, D. A., Lynch, A. M., y Swetnam, T. W. (2014). Fire severity, size, and climate associations diverge from historical precedent along an ecological gradient in the Pinaleño Mountains, Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 329, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.032>

ONIC. (2022). *La Sierra Nevada de Santa Marta: Territorio sagrado y en riesgo*. Organización Nacional Indígena de Colombia.

Pacheco Ramos, C. J., Graça, P. M. L. D. A., y Fearnside, P. M. (2025). Adjusted Δ NBR Index Thresholds for Forest Fire Severity Mapping: A Study in Central Amazonia. *Land Degradation y Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.5067>

Peñaloza, V., y Peñaloza, V. (s. f.). *172 hectáreas afectadas por incendios en la Sierra Nevada de Santa Marta*. <https://www.radionacional.co/noticias-colombia/172-hectareas-afectadas-por-incendios-en-la-sierra-nevada-de-santa-marta>

Pinto, M. M., Trigo, R. M., Trigo, I. F., y DaCamara, C. C. (2021). A practical method for high-resolution burned area monitoring using Sentinel-2 and VIIRS. *Remote Sensing*, 13(9), 1608. <https://doi.org/10.3390/rs13091608>

Pradhan, B., Dini Hairi Bin Suliman, M., y Arshad Bin Awang, M. (2007). Forest fire susceptibility and risk mapping using remote sensing and geographical information systems (GIS). *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 16(3), 344–352. <https://doi.org/10.1108/09653560710758306>

Radio Nacional de Colombia. (2024, febrero 6). *172 hectáreas afectadas por incendios en la Sierra Nevada de Santa Marta*. <https://www.radionacional.co/noticias-colombia/172-hectareas-afectadas-por-incendios-en-la-sierra-nevada-de-santa-marta>

Salcedo Meza, M. (2012). El espectro electromagnético. *Big Bang Faustiniiano*, 1(1). <https://doi.org/10.51431/bbf.v1i1.384>

Safford, H. D., Nicoll, K. C., Hammer, R. B., y Bohlman, G. N. (2022). The 2020 California fire season: A year like no other, a return to the past or a harbinger of the future? *Global Ecology and Biogeography*, 31(10), 2005–2025. <https://doi.org/10.1111/geb.13582>

Santos, F., Meneses, P., y Hostert, P. (2019). Monitoring long-term forest dynamics with scarce data: A multi-date classification implementation in the Ecuadorian Amazon. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup1), 62–78. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1585206>

Sayed, S. S., Abbott, B. W., Vanni re, B., Leys, B., Colombaroli, D., Romera, G. G., ... y Daniau, A. L. (2024). Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*, 20(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00255-1>

Schroter, D. (2005). Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science*, 310(5752), 1333–1337. <https://doi.org/10.1126/science.1115233>

Sultan, Y. E. D., Pillai, K. R. A., y Sharma, A. (2025). Wildfire indicators modeling for reserved forest of Vellore district (Tamil Nadu, India). *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1518539. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1518539>

Swetnam, T. W., Farella, J., Roos, C. I., Liebmann, M. J., Falk, D. A., y Allen, C. D. (2016). Multiscale perspectives of fire, climate and humans in western North America and the Jemez Mountains, USA. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696), 20150168. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0168>

UNESCO. (2021). *Biosphere Reserve Information: Sierra Nevada de Santa Marta*. <https://www.unesco.org>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., ... y 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>

Zikiou, N., Rushmeier, H., Capel, M. I., Kandakji, T., Rios, N., y Lahdir, M. (2024).
Remote Sensing and Machine Learning for Accurate Fire Severity Mapping in Northern Algeria.
Remote Sensing, 16(9), 1517. <https://doi.org/10.3390/rs16091517>