



Comparación de índices espectrales y cambios de cobertura pre y post incendio en octubre 2023, reserva “El Viche”, Tesalia-Huila.

Nicolás Sebastián Becerra Guerrero

Diego Atilano Trujillo Torres

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

Asesora: Ana María Giraldo Patiño, Magíster (MSc) en Teledetección.

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Becerra Guerrero & Trujillo Torres, 2025)
Referencia	Becerra Guerrero, N. S. & Trujillo Torres, D. A. (2025). <i>Comparación de índices espectrales y cambios de cobertura pre y post incendio en octubre 2023, reserva “El Viche”, Tesalia-Huila</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXX

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], 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.

Dedicatoria

A nuestros padres y hermanos por ser el pilar fundamental de todos los logros a lo largo de la vida, por su amor y apoyo incondicional, con su ejemplo se ha aprendido el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. A los demás familiares por su apoyo y compañía a lo largo de este proceso. A nuestros amigos y compañeros de la especialización en SIG de la cohorte XXX, por todos los momentos compartidos, son personas increíbles y una cohorte espectacular, esperamos seguir en contacto y cruzarnos a futuro ejerciendo como especialistas.

Agradecimientos

A la Universidad de Manizales, a todos los docentes de la especialización en SIG por compartir su amplio conocimiento de una manera eficiente y por siempre estar dispuestos a solucionar cualquier inquietud, en especial a la docente Ana María Giraldo, por la paciencia y gran apoyo brindado a lo largo de este proceso.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Planteamiento del problema	13
1.1 Antecedentes	15
2 Justificación.....	20
3 Objetivos	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4 Hipótesis.....	23
4.1 Hipótesis de trabajo	23
4.1.1 Hipótesis nula.....	23
4.1.1.1 Hipótesis alterna.....	23
4.1.1.1.1 Variables.....	23
5 Marco teórico	24
6 Metodología	27
6.1 Enfoque metodológico	27
6.2 Tipo de estudio	27
6.3 Procedimiento.....	27
6.3.1 Objetivo 1: Determinar las áreas afectadas por el incendio forestal mediante una clasificación supervisada antes y después del evento reportado en octubre del 2023.	28
Selección y descarga de imágenes satelitales de PlanetScope	28
<i>Clasificación</i> supervisada.....	28

6.3.2	Objetivo 2. Calcular los índices espectrales (NBR, dNBR y NDVI) pre y post incendio, con el fin de cuantificar el área afectada por el incendio y la severidad del daño en la cobertura vegetal	29
	<i>Selección y descarga de imágenes Sentinel-2</i>	30
	<i>Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema)</i>	30
	<i>Cálculo del dNBR (Diferencial del Índice Normalizado de Quema)</i>	30
	<i>Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada</i>	31
6.3.3	Objetivo 3. Analizar los resultados obtenidos de las áreas afectadas y su relación con los índices determinados.	32
7	Resultados	34
7.1	Objetivo 1	34
7.1.1	Clasificación supervisada pre incendio	34
7.1.2	Clasificación supervisada post-incendio	36
7.2	Objetivo 2.....	38
7.2.1	Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) pre-incendio	38
7.2.2	Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) post incendio.....	40
7.2.3	Cálculo del dNBR (Diferencial del Índice Normalizado de Quema).....	42
7.2.4	Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada pre-incendio	44
7.2.5	Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada post incendio	46
8	Discusión	49
9	Conclusiones	52
10	Recomendaciones.....	54
	Referencias	55
	Anexos.....	59

Lista de tablas

Tabla 1	28
Tabla 2	29
Tabla 3	31
Tabla 4	32
Tabla 5	34
Tabla 6	36
Tabla 7	38
Tabla 8	40
Tabla 9	42
Tabla 10	44
Tabla 11	46

Lista de figuras

Figura 1.	14
Figura 2.	35
Figura 3.	36
Figura 4.	37
Figura 5.	39
Figura 6.	41
Figura 7.	43
Figura 8.	45
Figura 9.	48

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CAR	Corporaciones Autónomas Regionales
BST	Bosque Seco Tropical
dNBR	Índice de Diferencia Normalizada de Área Quemada
NBR	Índice Normalizado de Área Quemada
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
RNSC.	Reserva Natural de la Sociedad Civil

Resumen

En Colombia, los incendios forestales constituyen una amenaza relevante para la conservación del ecosistema de bosque seco tropical. Estos eventos afectan negativamente la biodiversidad, deterioran las condiciones del suelo, modifican los ciclos ecológicos y contribuyen a la liberación de gases que intensifican el cambio climático.

El presente trabajo tiene como propósito analizar los impactos de un incendio forestal ocurrido en octubre de 2023 en la Reserva Forestal “El Viche”, ubicada en el municipio de Tesalia, Huila. Para ello, se aplicaron técnicas de teledetección mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales Sentinel-2, empleando índices espectrales como NDVI, NBR y dNBR, así como clasificación supervisada para delimitar las zonas afectadas.

Los resultados revelaron que más del 54% del área analizada fue clasificada como quemada, mientras que la severidad del evento fue baja o moderada. Además, se identificó que un 64,5% del territorio presenta vegetación en proceso de regeneración, y un 27,6% aún conserva buen estado de cobertura.

Estos hallazgos destacan la capacidad de recuperación del ecosistema, pero también alertan sobre su fragilidad ante perturbaciones recurrentes. Los productos generados constituyen una base técnica útil para la planificación ambiental, la gestión del riesgo y el diseño de estrategias de restauración del bosque seco tropical en la región.

Palabras clave: Índices espectrales, cambio de coberturas, Incendios forestales, imágenes satelitales, clasificación supervisada.

Abstract

In Colombia, wildfires pose a significant threat to the conservation of tropical dry forest ecosystems. These disturbances contribute to biodiversity loss, soil degradation, disruption of ecological processes, and the release of greenhouse gases that exacerbate climate change.

The purpose of this study is to analyze the impacts of a forest fire that occurred in October 2023 in the "El Viche" Forest Reserve, located in Tesalia, Huila. To achieve this, remote sensing techniques were applied through multitemporal analysis of Sentinel-2 satellite imagery. Spectral indices such as NDVI, NBR, and dNBR were used, in addition to supervised classification methods to identify and quantify affected areas.

Findings showed that over 54% of the analyzed area was categorized as burned. However, fire severity was mostly low to moderate. Approximately 64.5% of the landscape exhibited vegetation in regeneration stages, while 27.6% remained in good condition. These results highlight the ecosystem's resilience while underscoring its vulnerability to repeated disturbances. The spatial outputs and analysis presented in this study provide a valuable baseline for environmental management, wildfire risk assessment, and the development of conservation strategies for tropical dry forests in the region.

Keywords: Spectral indices, land cover change, wildfires, satellite imagery, supervised classification.

Introducción

Los incendios forestales constituyen una de las principales causas de degradación de los ecosistemas terrestres en Colombia, especialmente en regiones con alta vulnerabilidad climática y presión antrópica. Dentro de estos, el bosque seco tropical (BST) se considera uno de los ecosistemas más amenazados, debido a su baja cobertura remanente y a la recurrencia de incendios provocados por actividades humanas. Esta situación afecta de manera directa la biodiversidad, la funcionalidad ecológica y los servicios ecosistémicos estratégicos para las comunidades locales y la sostenibilidad ambiental del país.

El presente trabajo de grado tiene como propósito analizar el impacto del incendio forestal ocurrido en octubre de 2023 en la Reserva Forestal “El Viche”, ubicada en el municipio de Tesalia, Huila. Para ello, se integran herramientas de teledetección y análisis geoespacial que permiten evaluar, de forma cuantitativa y multitemporal, los cambios en la cobertura vegetal antes y después del evento. Se emplean imágenes satelitales Sentinel-2 y se aplican índices espectrales como NDVI, NBR y dNBR, además de técnicas de clasificación supervisada para la delimitación de áreas afectadas. La investigación se orienta a responder las siguientes preguntas: ¿cuál fue la magnitud del área afectada por el incendio forestal en la Reserva El Viche?, ¿qué grado de severidad se registró en la cobertura vegetal?, ¿qué patrones de regeneración post-incendio pueden identificarse a partir del análisis multitemporal?, y ¿cuál es la relación entre los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada y los índices espectrales aplicados?

Este estudio se justifica por la necesidad de generar información técnica precisa y actualizada sobre la dinámica de los incendios en el bosque seco tropical, un ecosistema poco estudiado a nivel local. Asimismo, la investigación busca aportar herramientas prácticas para el monitoreo ambiental y la toma de decisiones por parte de autoridades ambientales como las Corporaciones Autónomas Regionales. En este sentido, la combinación metodológica implementada no solo permite una evaluación detallada del impacto del incendio, sino que también ofrece un modelo replicable para otras zonas vulnerables del país.

De esta manera, el trabajo contribuye a cerrar brechas de conocimiento sobre la respuesta del BST ante eventos de fuego, proponiendo un enfoque integrador entre análisis espacial, indicadores biofísicos y planificación ambiental.

1 Planteamiento del problema

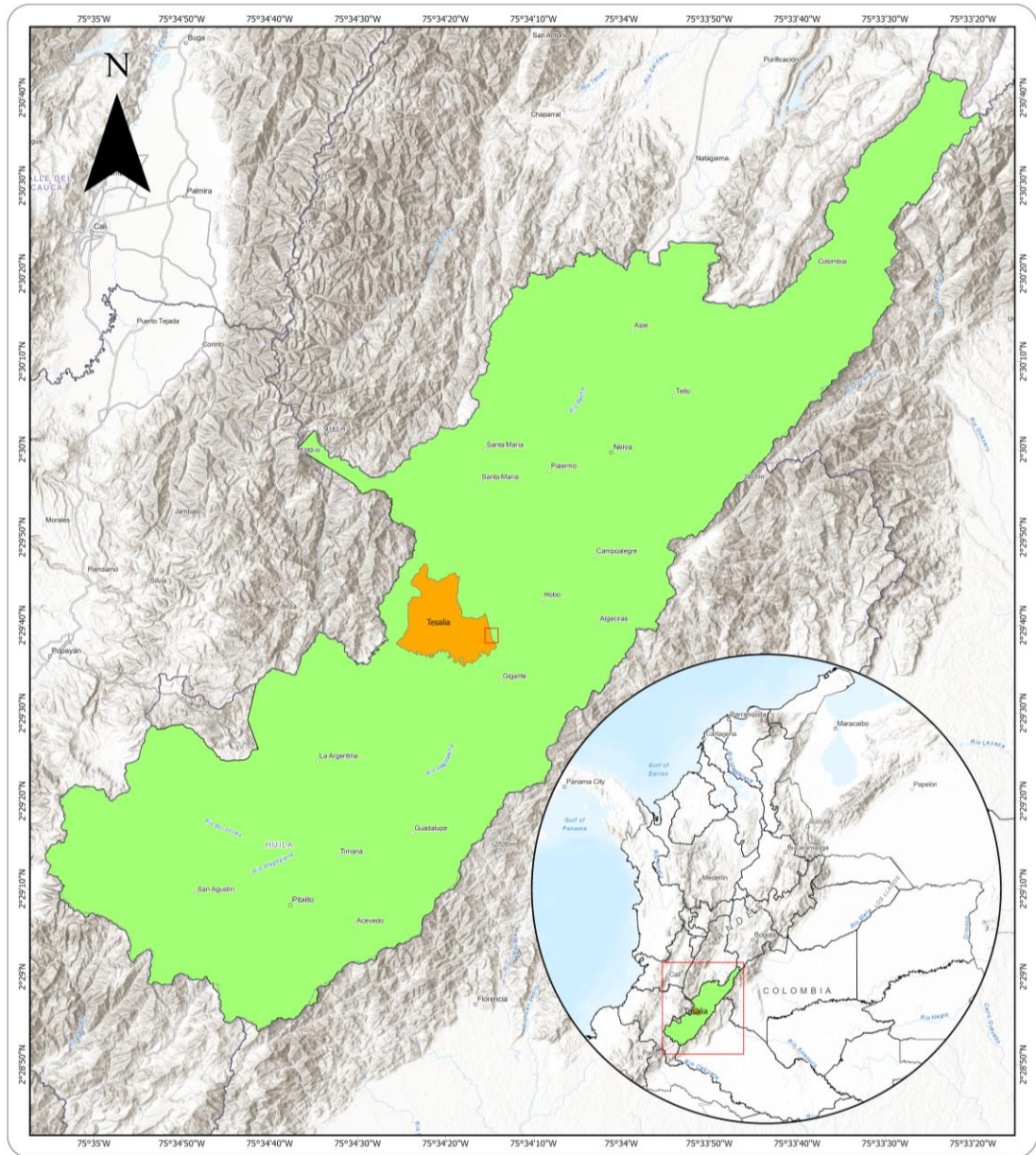
El bosque seco tropical (BST) es un ecosistema estratégico en Colombia el cual ha sido bastante perturbado a lo largo del tiempo, inicialmente el país contaba con cerca de 8 millones de hectáreas BST, sin embargo por diversas causas (ganadería, ampliación de la frontera agrícola, incendios forestales, entre otros) se ha visto fuertemente reducido llegando a tener en la actualidad cerca de 720.000 hectáreas, generando así que se pierda biodiversidad y servicios ecosistémicos que brindan los bosques (MinAmbiente , 2020). De estas 720.000 hectáreas, actualmente tan solo 26.800 (3.7% del total) están en la región Valle del Río Magdalena (Pizano, y otros, 2016), donde se encuentra ubicada el área de interés del presente proyecto que es la Reserva de la Sociedad Civil (RNSC) “El Viche” en el municipio de Tesalia en el departamento de Huila, la cual cuenta con parches de bosque seco que han sido afectados principalmente por incendios forestales.




La Reserva Forestal El Viche está ubicada en el municipio de Tesalia, en el departamento de Huila, Colombia. Esta reserva es un área protegida que forma parte del sistema de reservas forestales de la región andina del país, donde para llegar al área de estudio desde la ciudad de Neiva, toma la Ruta 45 (también conocida como la vía que conecta Neiva con el municipio de Pitalito). Esta carretera es una vía principal que conecta a la capital del Huila con varios municipios del sur del departamento, hasta el municipio de Tesalia, Al llegar a Tesalia, se debe tomar caminos rurales o secundarios hacia la Reserva Forestal El Viche, aproximadamente 15 minutos.

Esta Reserva Natural de la Sociedad Civil "EL VICHE", cuenta con una extensión total aproximada de 425 ha, y se encuentra conformada por varios predios, los cuales se encuentran localizados en el municipio de Tesalia en el departamento del Huila según la resolución 139 de 29 de junio 2023, "Por Medio De La Cual Se Aclara La Resolución No.132 Del 17 De Julio De 2008 Por Medio De La Cual Se Registra La Reserva Natural De La Sociedad Civil "El Viche" Y Se Toman Otras Disposiciones”

Figura 1.

Mapa de localización de la reserva forestal “El Viche”



<p>Anexo 8. Mapa de ubicación de la Reserva forestal "El Viche"</p>		<p>Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal</p>	
 <p>Municipio Tesalia Departamento Huila</p>	 <p>UNIVERSIDAD DE MANIZALES Facultad de Ciencias e Ingeniería</p>	<p>Escala: 1:8,000</p>  <p>Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, MET/NASA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS, Esri, USGS</p> <p>Referencia Espacial GCS: GCS WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326</p>	

Por otra parte, los incendios forestales son eventos catastróficos que generan impactos significativos en los ecosistemas, especialmente en áreas de bosque seco tropical como la Reserva Forestal "El Viche" en Tesalia, Huila. En el año 2023, esta reserva experimentó incendios forestales que alteraron su cobertura vegetal, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. A pesar de la gravedad de estos eventos, existe una falta de estudios detallados que cuantifiquen las áreas afectadas, identifiquen los factores que influyen en la susceptibilidad de la vegetación a los incendios y analicen los cambios en la cobertura vegetal pre y post incendio.

La utilización de índices espectrales como el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Área Quemada (dNBR) permiten evaluar de manera precisa los cambios en la cobertura vegetal y el impacto de los incendios. Sin embargo, no se ha realizado una comparación sistemática de estos índices en el contexto de la Reserva Forestal "El Viche" para determinar cuál de ellos ofrece la mejor precisión en la detección de áreas quemadas y en la evaluación de la recuperación post-incendio.

Por lo anteriormente descrito se tiene certeza que estos ecosistemas son muy vulnerables a diferentes problemáticas como lo son los incendios forestales, por lo que se considera importante hacer el análisis pre y post incendio y determinar el efecto en el cambio de cobertura por los incendios ocurridos en la Reserva Forestal "El Viche" en la época seca del segundo semestre del año 2023.

1.1 Antecedentes

Los incendios forestales en Colombia han sido objeto de estudio en diversas investigaciones, especialmente en el contexto de ecosistemas de interés como Bosque Seco Tropical. Estudios previos han demostrado que estos eventos climáticos aumentan la probabilidad de incendios debido a la sequía prolongada y la disminución de la humedad en la vegetación. En el caso de la Reserva Forestal "El Viche", no se han encontrado estudios previos que utilicen índices espectrales para evaluar los impactos de los incendios forestales. Esto representa una brecha en el conocimiento que este trabajo busca llenar, proporcionando una base científica para futuras

investigaciones y acciones de conservación en la región. Además, este estudio se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente con el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al contribuir a la protección y restauración de los ecosistemas afectados por incendios forestales.

Los incendios forestales en Colombia han sido objeto de estudio en diversos ecosistemas estratégicos, entre ellos el bosque seco tropical, un ecosistema especialmente vulnerable a las dinámicas del fuego debido a su baja humedad y marcada estacionalidad climática. En los últimos años, ha aumentado el interés por comprender la dinámica de estos eventos, tanto en sus causas como en sus consecuencias ecológicas y funcionales. Este interés se ve reforzado por situaciones críticas como la reportada por la Gobernación del Huila, que en septiembre de 2023 declaró la calamidad pública ante la magnitud de las emergencias ocurridas durante la segunda temporada seca del año. Hasta ese momento, se habían registrado 270 incendios forestales en 30 de los 37 municipios del departamento, afectando más de 10.000 hectáreas de pastos, rastrojos, arbustos y cultivos. Entre los municipios más afectados se encontraban Palermo, Yaguará, Tesalia (donde se localiza la Reserva Forestal “El Viche”), Teruel y Campoalegre (Gobernación del Huila, 2023).

En este contexto, se resalta la importancia de continuar investigando el comportamiento del fuego en ecosistemas como el bosque seco tropical. Ejemplo de ello son estudios desarrollados en el Caribe colombiano, como el de Sánchez-Tapia et al. (2020), quienes documentaron cómo la intensidad del incendio y la estructura previa del bosque influyen en su capacidad de regeneración natural, lo que resulta clave para entender los patrones de recuperación que podrían observarse en áreas como la Reserva “El Viche”. Por su parte, estudios como el de Álvarez et al. (2020) en La Guajira han demostrado la utilidad del NDVI y NBR para identificar áreas afectadas por incendios, sentando bases metodológicas para el uso de índices espectrales en ecosistemas secos del país. Asimismo, en la utilización de índices espectrales para el monitoreo de incendios, investigaciones recientes como la de Lee et al. (2024) han demostrado que el NBR es efectivo para identificar áreas quemadas y evaluar la severidad de los incendios, especialmente cuando se combina con otros datos de sensores remotos para mejorar la precisión del análisis.

En el Valle del Cauca, Galindo et. Al (2019) identificaron la relación directa entre actividades humanas y la recurrencia de incendios, lo que permite contextualizar los eventos del Huila dentro de una problemática nacional. A su vez, Rodríguez et al. (2018) cartografiaron cicatrices de incendios en la región Caribe mediante herramientas de teledetección, destacando la efectividad del monitoreo satelital para la evaluación de impactos. En la misma línea, Correa y Rangel (2017) evidenciaron que incendios recurrentes en bosque seco conllevan a la pérdida de diversidad florística y alteraciones en la estructura de la vegetación.

Estudios más localizados, como el de Martínez et al. (2022) en el Huila, han explorado la transformación del uso del suelo y su relación con procesos de degradación ambiental, aportando información útil sobre las dinámicas espaciales del paisaje en esta región. Investigaciones aplicadas como las de Cortés et al. (2019), en Cundinamarca, han probado la capacidad del dNBR para diferenciar niveles de severidad en incendios, lo cual respalda su implementación en nuestro análisis. De igual forma, trabajos como el de López y Guzmán (2021) en el Tolima resaltan la eficacia del NDVI para monitorear la recuperación post-incendio en ambientes áridos, evidenciando su potencial para medir la regeneración vegetal en zonas con características similares a las de nuestro estudio. Desde Boyacá, Gómez et al. (2021) han señalado cómo eventos climáticos extremos como El Niño incrementan la recurrencia de incendios en bosques secos, una conclusión que resulta pertinente al analizar las condiciones bajo las cuales se produjo el incendio en Tesalia, Huila. Finalmente, investigaciones orientadas a la gestión y conservación, como las de Beltrán y Sierra (2018), destacan la importancia de contar con información técnica precisa que permita definir estrategias adecuadas de restauración ecológica en áreas protegidas afectadas por el fuego.

En el plano internacional, la literatura ha consolidado una base metodológica robusta en torno al uso de índices espectrales para la evaluación de incendios forestales. Investigaciones recientes han demostrado que el índice dNBR es una herramienta eficaz para mapear áreas quemadas y evaluar la severidad del daño, especialmente cuando se combina con otros datos de sensores remotos para mejorar la precisión del análisis (Jones et al. 2024).

A partir de sus planteamientos, múltiples estudios han replicado y validado su utilidad en diversos contextos. Investigaciones recientes han demostrado que la combinación de índices espectrales derivados de sensores remotos con datos de campo mejora significativamente la precisión en la

evaluación de la severidad post-incendio, permitiendo una mejor comprensión de los impactos ecológicos y facilitando estrategias de restauración más efectivas (Smith & Doe, 2024).

Aplicaciones prácticas de esta metodología se evidencian en estudios recientes. Por ejemplo, Liu et al. (2025) analizaron la dinámica de recuperación post-incendio en regiones montañosas complejas, observando que la regeneración varía según la cobertura vegetal previa al incendio, con áreas de baja severidad mostrando una recuperación más rápida. Asimismo, el sistema FIRMS de la NASA proporciona datos en tiempo casi real sobre incendios activos a nivel global, utilizando sensores como MODIS y VIIRS, lo que ha mejorado significativamente la detección y monitoreo de incendios a gran escala. Además, enfoques integrados que combinan variables biofísicas y modelos espaciales han sido propuestos para evaluar el riesgo de incendios, permitiendo una mejor comprensión y gestión de estos eventos.

Estudios recientes han demostrado que la topografía y la vegetación previa al incendio son factores determinantes en la recuperación post-incendio, aportando elementos clave para analizar la heterogeneidad espacial del área estudiada. Asimismo, se ha encontrado que la severidad baja permite una recuperación más rápida de la vegetación, y que factores climáticos como la temperatura y la humedad del suelo influyen significativamente en la severidad del incendio, a menudo superando el impacto del historial de manejo forestal. Estas evidencias subrayan la importancia de considerar el contexto meteorológico reciente en el análisis del incendio ocurrido en la Reserva El Viche (Zahura, et al. 2024).

Avances más recientes como los de Smith et al. (2014) han modelado la severidad a partir de variables espectrales y climáticas, lo cual representa un aporte valioso para diseñar herramientas predictivas en zonas con alta recurrencia de incendios. Finalmente, estudios como los de Yebra (2013) y Fernández-Manso (2016) han optimizado modelos operativos de monitoreo con imágenes de satélite, permitiendo generar información de forma casi inmediata tras un evento de incendio, lo que puede convertirse en una herramienta clave para la toma de decisiones en escenarios de emergencia ambiental.

En conjunto, estos antecedentes proporcionan una base teórica y metodológica sólida que justifica y orienta la propuesta de este trabajo, centrado en el análisis de índices espectrales y cambios en la cobertura vegetal como herramientas para evaluar el impacto del incendio ocurrido en octubre de 2023 en la Reserva Forestal “El Viche”. Así, se busca no solo llenar vacíos de conocimiento local, sino también aportar insumos útiles para la conservación y recuperación del bosque seco tropical en Colombia.

2 Justificación

Los incendios forestales representan una de las principales amenazas para los ecosistemas de Bosque Seco Tropical (Bs-T), como el presente en la Reserva Forestal "El Viche". Estos eventos no solo generan pérdida de biodiversidad y degradación del suelo, sino que también agravan la crisis climática al liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

Durante la temporada seca del segundo semestre de 2023, el impacto de los incendios forestales sobre la cobertura vegetal del Bs-T ha sido especialmente severo. Las altas temperaturas y la escasa humedad propias de esta época intensificaron la destrucción de grandes extensiones de vegetación, alterando su estructura, composición y funcionalidad. Esto ha derivado en una acelerada pérdida de biodiversidad, afectando especies endémicas y reduciendo la resiliencia ecológica del ecosistema. Adicionalmente, se ha intensificado la erosión del suelo y disminuido la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la protección de cuencas hidrográficas.

En el departamento del Huila, los incendios reportados desde hace tiempo han generado transformaciones importantes en el paisaje, facilitando la conversión de áreas boscosas en pastizales o terrenos degradados. Esta situación incrementa la urgencia de contar con herramientas de monitoreo espacial que permitan evaluar tanto el daño como la capacidad de recuperación de estos ecosistemas estratégicos.

En este contexto, el presente estudio cobra especial relevancia para diferentes autoridades ambientales y entidades estatales o privadas que se interesen por el tema del bosque seco tropical y su relación con los incendios, como por ejemplo la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), ya que se proporcionarán insumos técnicos y científicos fundamentales para fortalecer los procesos de ordenamiento ambiental, monitoreo del territorio, gestión del riesgo y restauración ecológica. A través del uso de imágenes Sentinel-2 y el cálculo de índices espectrales como el NDVI, NBR y dNBR, se ofrece una evaluación objetiva del antes y después del incendio, permitiendo detectar zonas afectadas, niveles de severidad y áreas en regeneración.

El aporte de esta investigación radica en la combinación de técnicas de teledetección y análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo generar productos cartográficos precisos y comparables en el tiempo. Además, se propone una metodología replicable para el seguimiento post-incendio, la cual puede ser implementada por otras entidades a nivel nacional.

De manera particular, este estudio también contribuye a la conservación y recuperación del Bosque Seco Tropical, ya que permite identificar áreas prioritarias para restauración ecológica y establecer líneas base para la medición de la efectividad de las intervenciones futuras. Al conocer el nivel de afectación y la capacidad natural de regeneración del ecosistema, se pueden diseñar planes de manejo adaptativo más eficientes, que promuevan la restauración activa en zonas severamente afectadas y la regeneración natural en aquellas con menor daño. Este conocimiento es clave para garantizar la sostenibilidad ecológica de la reserva a largo plazo y preservar los servicios ecosistémicos que provee a las comunidades locales.

Los principales beneficiarios de esta investigación son la CAM y diferentes entes encargados de tomar decisiones en materia ambiental, las organizaciones encargadas de la conservación y restauración del bosque seco tropical, y las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas para su sustento.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar una comparación de índices espectrales y cambios de coberturas pre y post al incendio reportado en octubre del 2023 en la reserva forestal “El Viche” en el municipio de Tesalia (Huila).

3.2 Objetivos específicos

- Determinar las áreas afectadas por el incendio forestal mediante una clasificación supervisada antes y después del evento reportado en octubre del 2023.
- Cuantificar la severidad del daño en la cobertura vegetal a través del cálculo de índices espectrales (NBR, dNBR y NDVI) aplicados a imágenes antes y después del incendio.
- Analizar los resultados obtenidos de las áreas afectadas y su relación con los índices determinados.

4 Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

El presente trabajo parte de la premisa de que los incendios forestales generan cambios cuantificables en la cobertura vegetal, los cuales pueden ser detectados y analizados mediante herramientas de teledetección. Se considera que la combinación de índices espectrales multitemporales (NDVI, NBR y dNBR) con técnicas de clasificación supervisada permite estimar de forma confiable tanto la severidad del daño como el estado de regeneración de la vegetación afectada. En este sentido, se plantea una hipótesis de trabajo que busca explicar la relación entre la ocurrencia del incendio y las transformaciones en la estructura del paisaje dentro del ecosistema de bosque seco tropical.

4.1.1 Hipótesis nula

No existe una relación significativa entre los resultados obtenidos a partir de los índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) y los cambios en la cobertura vegetal antes y después del incendio forestal ocurrido en la Reserva El Viche. Asimismo, la aplicación de la clasificación supervisada no aporta diferencias sustanciales en la delimitación de áreas afectadas.

4.1.1.1 Hipótesis alterna. Sí existe una relación significativa entre los valores de los índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) y los cambios detectados en la cobertura vegetal antes y después del incendio forestal en la Reserva El Viche, siendo estos índices útiles para cuantificar tanto el nivel de afectación como el proceso de regeneración post-incendio. Además, la clasificación supervisada permite delimitar con precisión las áreas impactadas, complementando el análisis multitemporal.

4.1.1.1.1 Variables. La variable independiente es la ocurrencia del incendio forestal en octubre de 2023 en la Reserva El Viche, mientras que las variables dependientes son: (1) la cobertura vegetal clasificada a partir de imágenes multitemporales, (2) los valores de los índices espectrales NDVI, NBR y dNBR, y (3) los niveles de severidad y regeneración registrados posterior al evento.

5 Marco teórico

El bosque seco tropical (BST) es uno de los ecosistemas más amenazados del país y del mundo, pese a su importancia ecológica y funcional. En Colombia, su distribución original ha sido drásticamente reducida por actividades humanas como la agricultura extensiva, la ganadería y la urbanización. De los cerca de 8 millones de hectáreas que existían originalmente, hoy solo subsisten alrededor de 720.000 ha en estado natural, con concentraciones importantes en regiones como el Caribe, el valle del río Cauca y el valle del Magdalena (MinAmbiente, 2020; IAVH, 2016).

El BST se distribuye en distintas regiones del país: la región Caribe alberga cerca de 394.000 ha, la región Norandina 184.000 ha, la región del valle del río Cauca aproximadamente 31.200 ha, los Llanos 77.000 ha, el valle del río Patía 24.800 ha y el valle del río Magdalena 26.800 ha. Esta última es una de las zonas más afectadas, representando apenas el 3,7 % del total de cobertura del BST en Colombia (IAVH, 2016). Esta pérdida ha comprometido servicios ecosistémicos vitales como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de especies endémicas (Gámez & Martínez, 2018).

Algunos de los factores por los que la cobertura del bosque seco tropical se ha venido disminuyendo con el paso de los años son ganadería y agricultura extensiva, lo que hace que la frontera agrícola se vaya ampliando cada vez más y se afecte directamente la composición estructural y funcional del bosque seco tropical, comprometiendo su capacidad de regeneración, otro factor determinante son los incendios forestales que también pueden estar relacionados con los aspectos anteriormente mencionados ya que para ampliar la frontera agrícola se pueden hacer talas o quemas producto de actividades antrópicas, sin embargo también pueden darse incendios por causas naturales por las condiciones ambientales de este tipo de ecosistemas ya que cuenta con altas temperaturas y especies vegetales con contenidos altamente inflamables (Rodríguez & Gómez, 2021; Pérez & Álvarez, 2022).

Con base a lo anteriormente descrito, la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero son algunas de las consecuencias más significativas en cuanto a incendios forestales (Rodríguez (Rodríguez H. , 2020 Ante este

panorama, las herramientas geospaciales se han convertido en aliadas fundamentales para el monitoreo y gestión de estos ecosistemas.

En la zona de estudio, el análisis multitemporal y el uso de índices espectrales permitieron identificar que las principales causas de los incendios en la Reserva Forestal El Viche están relacionadas con factores como, prácticas agrícolas (quemadas para la preparación del terreno y pastoreo): Las actividades humanas, especialmente las relacionadas con la agricultura y la ganadería, han sido una causa predominante de los incendios en la región. Condiciones climáticas extremas (sequías prolongadas y altas temperaturas): Las anomalías climáticas en la región han contribuido significativamente a la incidencia de incendios forestales, ya que las altas temperaturas y la falta de lluvia han dejado la vegetación seca y altamente inflamable.

El uso de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG) permite detectar, cuantificar y analizar los cambios en la cobertura vegetal asociados a eventos de incendio, con precisión espacial y temporal adecuada (Chuvienco et al., 2016; Roy et al., 2019). Dentro de estas técnicas, los índices espectrales como el Normalized Burn Ratio (NBR) y su derivado, el dNBR, han demostrado ser eficaces para detectar áreas afectadas por fuego mediante la comparación multitemporal de imágenes satelitales previas y posteriores al evento (Key & Benson, 2006; Giglio et al., 2018). Estos índices permiten identificar el comportamiento espectral de la vegetación antes y después de un incendio, facilitando la interpretación de la severidad del evento y sus impactos ecológicos. permitiendo obtener información coherente, de bajo costo y con alta frecuencia temporal, facilitando la toma de decisiones a las diferentes autoridades ambientales (Chuvienco et al., 2019).

Estudios internacionales, como los de Roy et al. (2021), han demostrado la utilidad del NBR y dNBR en diferentes contextos ecológicos, desde bosques boreales hasta tropicales. La integración de estos índices con algoritmos de clasificación supervisada ha incrementado la precisión en la detección de impactos por incendios (Schroeder et al., 2016; Senf et al., 2018).

En el ámbito nacional, se han hecho esfuerzos por aplicar estas técnicas principalmente en la Amazonía y la Orinoquía, dejando rezagadas otras regiones como el Huila, que también

presentan alta vulnerabilidad (González et al., 2021). Además, existe escasa estandarización metodológica para la comparación entre distintos índices espectrales en áreas protegidas.

El presente trabajo busca reducir esa brecha mediante un enfoque multitemporal que combine teledetección y análisis SIG para evaluar los efectos del incendio ocurrido en la Reserva El Viche. El objetivo es generar una línea base confiable que permita identificar el estado del ecosistema y orientar acciones de restauración y conservación del bosque seco tropical en la región.

6 Metodología

Para el desarrollo del objetivo principal de esta investigación, que fue “Efectuar una comparación de índices espectrales y cambios de coberturas pre y post a los incendios reportados en octubre del 2023 en la reserva forestal El Viche, en el municipio de Tesalia (Huila)”, se identificó el enfoque metodológico a implementar junto con el tipo de estudio y el respectivo procedimiento a ejecutar, lo cual se expresa a continuación.

6.1 Enfoque metodológico

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, ya que cumplió con varias de las características que este enfoque plantea, como la correlación de diferentes variables. En este caso, las variables fueron de tipo ambiental, específicamente en cuanto a los incendios (área quemada, localización, entre otros), junto con variables ambientales y el cambio de coberturas.

Por otra parte, la investigación cumplió con las fases de este enfoque, debido a que contó con una teoría, hipótesis, observaciones, recolección de datos, análisis de datos y los resultados obtenidos. Finalmente, la propuesta fue de tipo “Ex post facto”, ya que se buscó relacionar y comparar un efecto producido por los incendios forestales en años anteriores sobre las coberturas del área de estudio.

6.2 Tipo de estudio

El tipo de investigación que se utilizó fue la Investigación Básica, dado que este tipo de investigación científica busca ampliar la información con el objetivo de mejorar teorías para una mejor comprensión y predicción del objeto de estudio. Esto se logró a partir del cálculo de índices espectrales con ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG), utilizando específicamente una clasificación supervisada de coberturas.

6.3 Procedimiento

A continuación, se describe la metodología utilizada para cada uno de los objetivos específicos planteados:

6.3.1 Objetivo 1: Determinar las áreas afectadas por el incendio forestal mediante una clasificación supervisada antes y después del evento reportado en octubre del 2023.

Selección y descarga de imágenes satelitales de PlanetScope

Para el desarrollo de este objetivo se utilizó el software ArcGIS Pro donde se trabajó con las imágenes satelitales seleccionadas de PlanetScope con resolución espacial de 3 a 5 metros, capturadas antes y después del evento de incendio en la reserva El Viche. Para ello, se utilizaron las siguientes fechas:

- Imagen pre-incendio: Se eligió una imagen con condiciones óptimas (sin nubosidad) anterior al 5 de octubre de 2023.
- Imagen post-incendio: Se seleccionó una imagen posterior al evento, lo más cercana posible al 5 de octubre de 2023, para analizar el impacto posterior.

Tabla 1

Información de las imágenes satelitales utilizadas.

Información	Imágenes pre-incendio	Imágenes post-incendio
Fecha	03-10-2023	21-10-2025
Sensor	MSI	MSI
Satélite	Sentinel-2A / 2B – L2A	Sentinel-2A / 2B – L2A
Resolución espacial	10 m	10 m

Clasificación supervisada

Se subieron las imágenes descargadas al software ArcGIS Pro, donde se creó un shape file para las muestras de entrenamiento, estas muestras se crearon por medio de puntos para las siguientes coberturas.

- Vegetación no afectada (Arbustal denso y Bosque Abierto)
- Área quemada (Solo aplica para la clasificación post incendio)
- Suelo desnudo

Se seleccionaron las siguientes cantidades de muestras de entrenamiento para cada cobertura en las imágenes pre y post-incendio.

Tabla 2

Número de Muestras de entrenamiento por cobertura vegetal

Código CLC	Cobertura	Cantidad de muestras pre incendio (puntos)	Cantidad de muestras post incendio (puntos)
3.1.2	Bosque abierto	984	911
3.2.2.1	Arbustal denso	923	748
3.3.3	Tierras desnudas	1092	404
3.3.4	Zonas quemadas	No aplica	775

Se validaron las muestras con fuentes auxiliares como los reportes que tiene la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena acerca de dichos incendios. Posteriormente se seleccionó la herramienta “Create Signature” para obtener cada firma de cada cobertura definida y luego utilizar dicha firma con la herramienta “Maximum Likelihood” y poder obtener la clasificación supervisada y poder calcular las áreas afectadas y posteriormente analizar por medio de la cuantificación la severidad y alcance del incendio. Este procedimiento se realizó tanto para las imágenes pre y post incendio.

6.3.2 Objetivo 2. Calcular los índices espectrales (NBR, dNBR y NDVI) pre y post incendio, con el fin de cuantificar el área afectada por el incendio y la severidad del daño en la cobertura vegetal

Con el fin de analizar la vegetación y evaluar la severidad de áreas afectadas por incendios, se calcularon los índices espectrales NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NBR (Índice de Diferencia Normalizada de Quemadas) y dNBR (diferencia de NBR pre y post-incendio) a partir de imágenes multiespectrales Sentinel-2.

Selección y descarga de imágenes Sentinel-2

Se descargaron dos imágenes Sentinel-2 nivel L2A (corregidas atmosféricamente) desde la plataforma Copernicus Open Access Hub correspondientes a los momentos pre (1 de octubre de 2023) y post incendio (30 noviembre de 2023)

Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quemado)

El NBR es un índice utilizado para detectar áreas quemadas y evaluar la severidad del fuego. Su ecuación es:

$$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12}$$

Donde:

B8: Infrarrojo cercano (NIR)

B12: Infrarrojo de onda corta (SWIR2)

Esta operación se realizó por medio de la herramienta “Raster Calculator”, y se realizó con las bandas 8 y 12 como se evidencia en la anterior ecuación. Este índice se calculó tanto para pre como post incendio.

Cálculo del dNBR (Diferencial del Índice Normalizado de Quemado)

El dNBR representa la diferencia entre el NBR pre y post incendio y permite cuantificar la severidad del daño. Su ecuación es:

$$dNBR = NBR (pre) - NBR (post)$$

Se utilizó la herramienta “Raster Calculator” para restar los dos NBR previamente generados, el resultado obtenido se reclasificó de acuerdo a lo propuesto por Arellano et al. (2019), donde:

Tabla 3.

Categorías de clasificación del índice dNBR y NBR.

dNBR	Severidad del fuego
< 0.1	Regeneración alta
0.1 – 0.27	Regeneración baja
0.27 – 0.44	No quemado
0.44 – 0.66	Baja severidad
> 0.66	Severidad moderada alta

Esta clasificación también se tuvo en cuenta para el índice de quema normalizado (NBR).

Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El NDVI es un índice que permite evaluar la salud y cobertura de la vegetación. Se calculó mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Donde:

B8: Banda del infrarrojo cercano.

B4: Banda rojo.

Al igual que los dos anteriores índices se utilizó la herramienta “Raster Calculator” para hacer el respectivo cálculo. Posteriormente se realizó una reclasificación adaptando parcialmente la metodología de Tucker (1979), así:

Tabla 4.*Categorías de clasificación del NDVI*

NDVI	Tipo de Cobertura
< 0	Agua - Nubes
0 – 0.1	Zonas áridas
0.1 – 0.2	Arbustos pastizales
0.2 – 0.3	Vegetación en regeneración
0.3 – 0.5	Vegetación en buen estado

6.3.3 *Objetivo 3. Analizar los resultados obtenidos de las áreas afectadas y su relación con los índices determinados.*

Para el cumplimiento de este objetivo se implementó una metodología comparativa, con el fin de evaluar la correspondencia entre los resultados obtenidos a través de la clasificación supervisada y los derivados de los índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR). Esta comparación permitió validar la precisión de la cuantificación de áreas afectadas y conocer cómo se comportan los distintos índices frente a los cambios en la cobertura vegetal producto de incendios forestales.

El enfoque metodológico se sustentó en una serie de análisis complementarios que permitieron comparar los resultados obtenidos a partir de la clasificación supervisada y los índices espectrales, particularmente el índice dNBR. En primer lugar, se realizó un análisis espacial mediante la superposición de los mapas generados por ambos métodos. Esta operación permitió identificar las zonas de coincidencia y discrepancia espacial, lo cual fue clave para observar cómo se distribuyen las áreas clasificadas como afectadas dentro de la Reserva Forestal "El Viche".

Complementariamente, se llevó a cabo un análisis porcentual y de área, en el cual se estimaron la superficie total (en hectáreas) y la proporción relativa (en porcentaje) de las zonas

afectadas identificadas por cada enfoque. Este análisis permitió evaluar si los índices espectrales tienden a sobrestimar o subestimar el impacto en relación con la clasificación supervisada, o viceversa.

Finalmente, se desarrolló un análisis temático y de severidad, centrado en la comparación entre las clases temáticas de severidad del dNBR (no afectado, baja, media y alta) y las categorías definidas en la clasificación supervisada. Esta comparación permitió evaluar la coherencia conceptual entre ambas metodologías.

En conjunto, estos análisis conformaron un enfoque metodológico integral que no solo permitió validar y complementar los resultados obtenidos mediante teledetección, sino también ofrecer una evaluación más precisa del impacto de los incendios forestales sobre el ecosistema de bosque seco tropical. Además, la comparación entre las metodologías de la clasificación supervisada y el uso de índices espectrales permitió identificar fortalezas y limitaciones de cada enfoque, aportando elementos valiosos para el diseño de futuras estrategias de monitoreo ambiental en diferentes áreas de interés.

7 Resultados

7.1 Objetivo 1

7.1.1 Clasificación supervisada pre incendio

Al realizar la clasificación supervisada de la reserva forestal de interés, se obtuvieron los siguientes resultados pre incendio:

Tabla 5.

Resultados Clasificación supervisada pre incendio

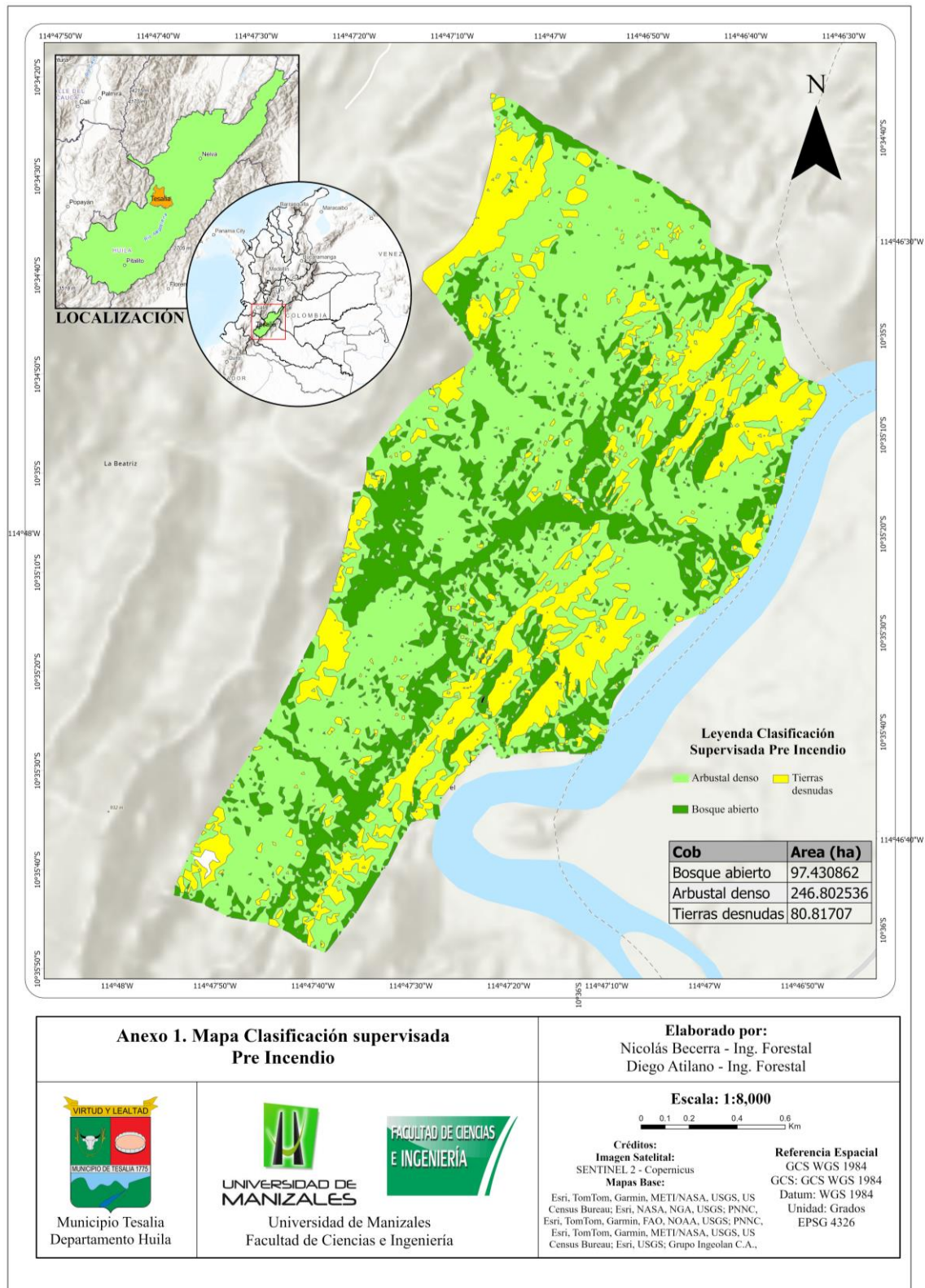
Código CLC	Cobertura	Área (ha)	Porcentaje de cobertura (%)
3.1.2	Bosque abierto	97.4	22.9
3.2.2.1	Arbustal denso	246.9	58.1
3.3.3	Tierras desnudas	80.8	19.0
	Total	425.1	100%

Como se evidencia en la tabla anterior, la cobertura predominante en el escenario previo al incendio correspondía a arbustal denso, con un 58% del área total. Esta fue seguida por bosque abierto, con un 22,9%, y finalmente por tierras desnudas, que representaron el 19%. Es importante destacar que tanto el bosque abierto como el arbustal denso hacen parte del ecosistema de bosque seco tropical. Este dato permite entender el alto porcentaje de arbustal denso, ya que (como se mencionó previamente) el bosque seco tropical en Colombia ha sido gravemente afectado por actividades antrópicas.

En consecuencia, los relictos de bosque bien conservado son escasos, lo cual se refleja en el 22,9% de cobertura de bosque abierto registrado. La mayor parte del área corresponde a zonas en procesos de regeneración, con vegetación en etapas iniciales o juveniles. Lo anteriormente mencionado se puede apreciar visualmente a continuación (Véase Anexo 1.)

Figura 2.

Mapa de la clasificación supervisada pre-incendio



7.1.2 Clasificación supervisada post-incendio

Tras aplicar la clasificación supervisada sobre la reserva forestal en estudio, se obtuvieron los siguientes resultados correspondientes al escenario post incendio:

Tabla 6.

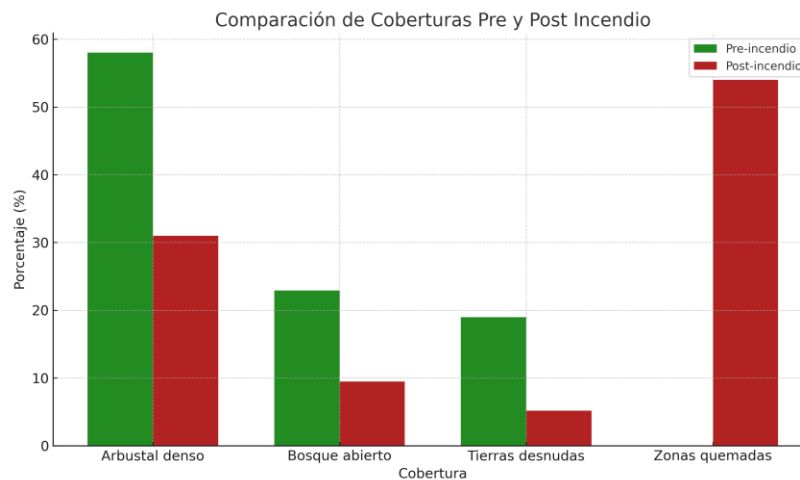
Resultados Clasificación supervisada post incendio

Código CLC	Cobertura	Área (ha)	Porcentaje de cobertura (%)
3.1.2	Bosque abierto	40.2	9.5
3.2.2.1	Arbustal denso	132.3	31.1
3.3.3	Tierras desnudas	22.1	5.2
3.3.4	Zonas quemadas	230.5	54.2
Total		425.1	100%

De acuerdo con la información presentada en la tabla anterior, la cobertura dominante después del incendio fue “Zonas quemadas”, ocupando el 54% del área analizada. En segundo lugar, se ubicó “arbustal denso”, con un 31%, seguido por “Bosque abierto”, que representa el 9.5% del total y finalmente con un 5.2% tierras desnudas.

Figura 3.

Comparación de las coberturas vegetales pre y post incendio.

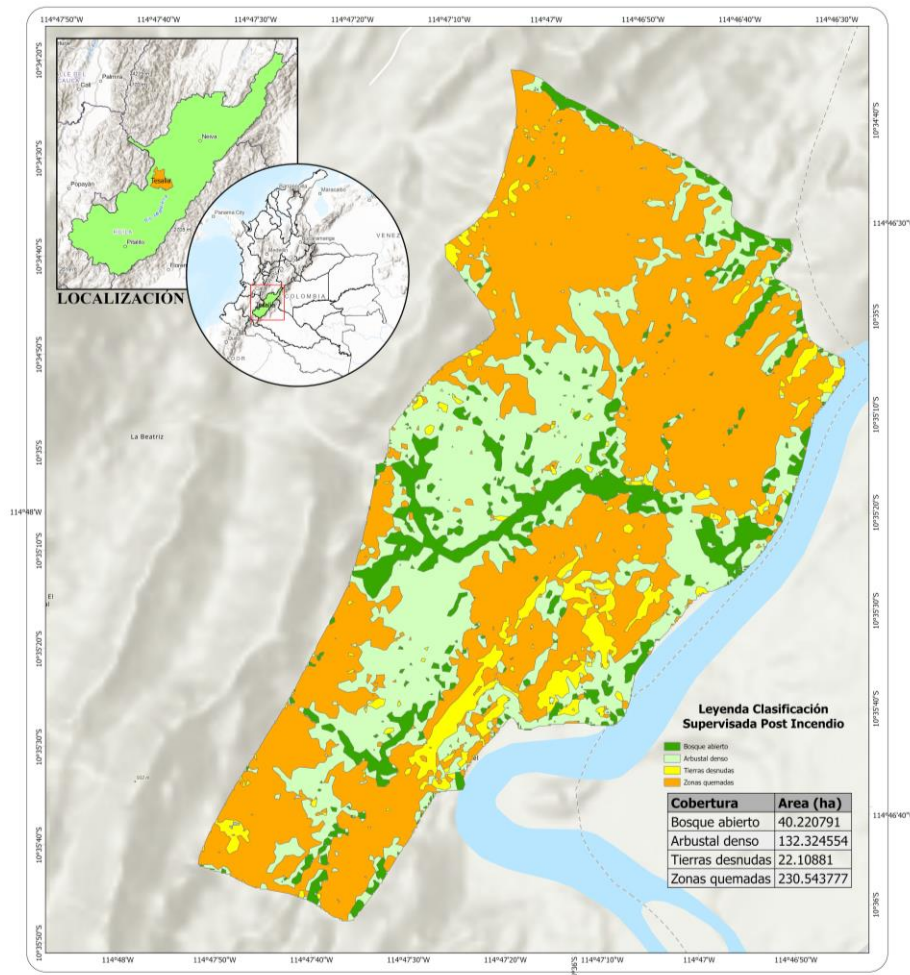


Como se evidencia en la anterior gráfica al comparar la cobertura del área de estudio antes y después del incendio, se evidencian cambios significativos en la distribución del paisaje. La cobertura de arbustal denso presentó una disminución del 27%, pasando de cubrir el 58% del área

total a un 31% en el escenario posterior al incendio. De manera similar, el bosque abierto se redujo en 13.4%, y las tierras desnudas disminuyeron en 13.8%. Estos descensos en la cobertura vegetal coinciden con la aparición de una nueva categoría: zonas quemadas, que pasó a ocupar el 54% del área analizada. Estos resultados reflejan el fuerte impacto del incendio sobre el ecosistema, evidenciando la pérdida de cobertura vegetal, especialmente de formaciones propias del bosque seco tropical. Esto se puede evidenciar de manera visual a continuación (Véase Anexo 2).

Figura 4.

Mapa de clasificación supervisada Post incendio.



Anexo 2. Mapa Clasificación supervisada Post Incendio		Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Universidad de Manizales Facultad de Ciencias e Ingeniería	 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA	Escala: 1:8,000  0 0.1 0.2 0.4 0.6 Km Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, TomTom, Garmin, METUNASA, USGS, US Census Bureau; Esri, NASA, NGA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS; PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METUNASA, USGS, US Census Bureau; Esri, USGS; Grupo
		Referencia Espacial GCS: WGS 1984 GCS: WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326	

7.2 Objetivo 2.

7.2.1 Cálculo del NBR (*Índice Normalizado de Quema*) pre-incendio

Una vez se calculó el NBR para el pre incendio se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7.

Resultados cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) pre-incendio.

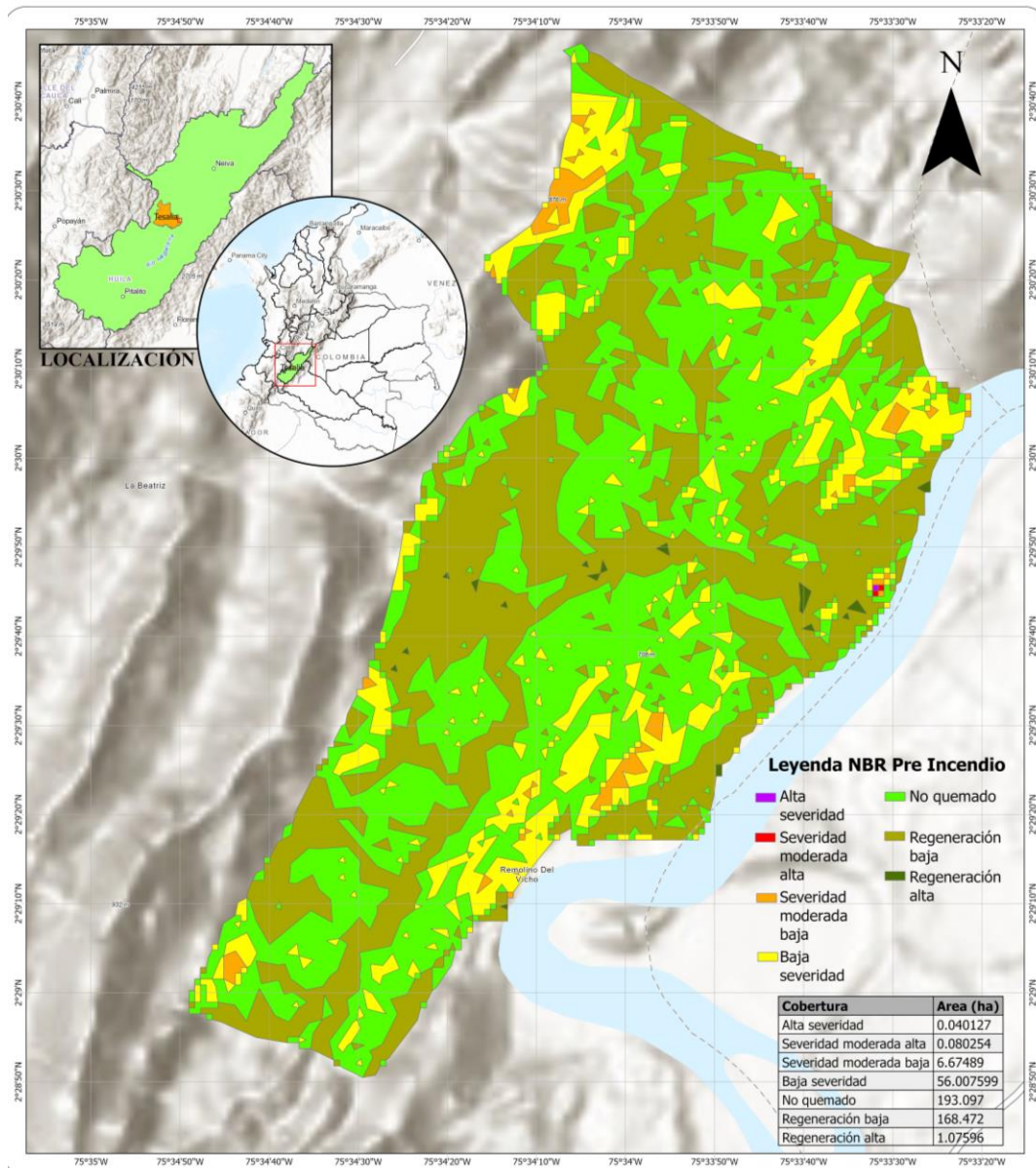
Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Alta severidad	0.04	0.0
Severidad moderada a alta	0.08	0.0
Severidad moderada a baja	6.6	1.6
Baja severidad	56.0	13.2
No quemado	193.0	45.4
Regeneración baja	168.4	39.6
Regeneración alta	1.07	0.3
Total	425.1	100%

Con base en la tabla anterior, se observa que la categoría “No quemado” presentó el mayor porcentaje de área, con un 45%, seguida de “Regeneración baja”, con un 39%. Estas dos clases representan las coberturas más significativas dentro de la reserva, según el cálculo del índice NBR. Por el contrario, las categorías de “Alta severidad” y “Severidad moderada-alta” tuvieron una representación mínima.

Este resultado es coherente, ya que en el escenario previo al incendio la vegetación aún no había sido afectada por dicho evento, lo que explica la baja presencia de áreas con indicios de severidad alta. Esto se puede evidenciar a continuación (Véase Anexo 3).

Figura 5.

Mapa de cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) pre-incendio.



Anexo 3. Mapa del Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) Pre Incendio		Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Universidad de Manizales Facultad de Ciencias e Ingeniería		Escala: 1:8,000  Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, NASA, NGA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS, US Census Bureau, Esri, USGS, Grupo Ingeolan C.A., PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS
		Referencia Espacial GCS WGS 1984 GCS: GCS WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326	

7.2.2 Cálculo del NBR (*Índice Normalizado de Quema*) post incendio

Al completar el cálculo del NBR para el escenario post incendio, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 8.

Resultados Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) post incendio

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Alta severidad	0.51	0.1
Severidad moderada a alta	92.0	21.6
Severidad moderada a baja	220.8	51.9
Baja severidad	101.7	23.9
No quemado	8.4	2.0
Regeneración baja	1.6	0.4
Regeneración alta	0.2	0.0
Total	425.1	100%

Según la tabla anterior, la categoría “Severidad moderada a baja” abarcó la mayor proporción del área analizada, con un 51%, seguida por “Baja severidad” con un 23%, y “Severidad moderada a alta”, que representó un 21%. Estas tres clases constituyen las coberturas más representativas dentro de la reserva, de acuerdo con los resultados del índice NBR. En contraste, las categorías “Regeneración baja” y “Regeneración alta” presentaron una participación marginal en el total del área evaluada.

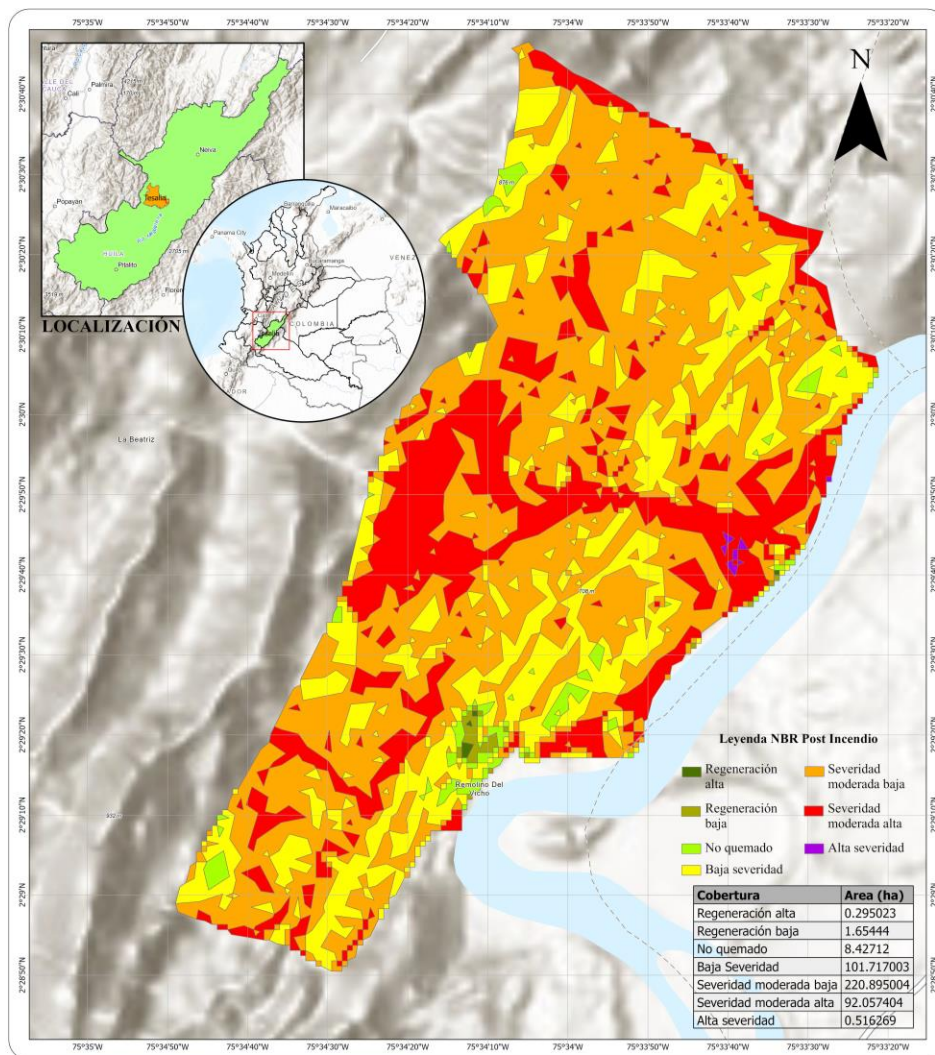
Al analizar las coberturas mediante el índice NBR antes y después del incendio, se evidencian cambios sustanciales en la composición del paisaje.

Previo al evento, las clases dominantes fueron “No quemado” (45%) y “Regeneración baja” (39%), reflejando una cobertura mayoritariamente no afectada por fuego y zonas en recuperación inicial. Sin embargo, en el escenario posterior al incendio, estas categorías desaparecen completamente, lo cual es coherente con la ocurrencia del evento perturbador. Posteriormente, las categorías “Severidad moderada a baja” (51%), “Baja severidad” (23%) y “Severidad moderada-alta” (21%) se convirtieron en las clases más representativas, indicando una afectación generalizada, pero con distintos niveles de severidad. Por otro lado, la categoría “Regeneración alta” aparece baja representatividad, mientras que “Alta severidad” no muestra valores significativos en el escenario

post-incendio. Esta transformación en las coberturas refleja el impacto del fuego y la dinámica de recuperación del ecosistema en la reserva evaluada. Esto se puede apreciar a continuación. (Véase Anexo 4).

Figura 6.

Mapa de cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) post incendio



Anexo 4. Mapa del Cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) Post Incendio		Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Universidad de Manizales Facultad de Ciencias e Ingeniería		Escala: 1:8,000  0 0.1 0.2 0.4 0.6 Km Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, NASA, NGA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METNASA, USGS, US Census Bureau, Esri, USGS, Grupo Ingeolán C.A., PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS Referencia Espacial GCS WGS 1984 GCS: GCS WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326

7.2.3 Cálculo del dNBR (*Diferencial del Índice Normalizado de Quema*)

Posterior al cálculo del diferencial del índice normalizado de quema, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 9.

Resultados Cálculo del dNBR (Diferencial del Índice Normalizado de Quema)

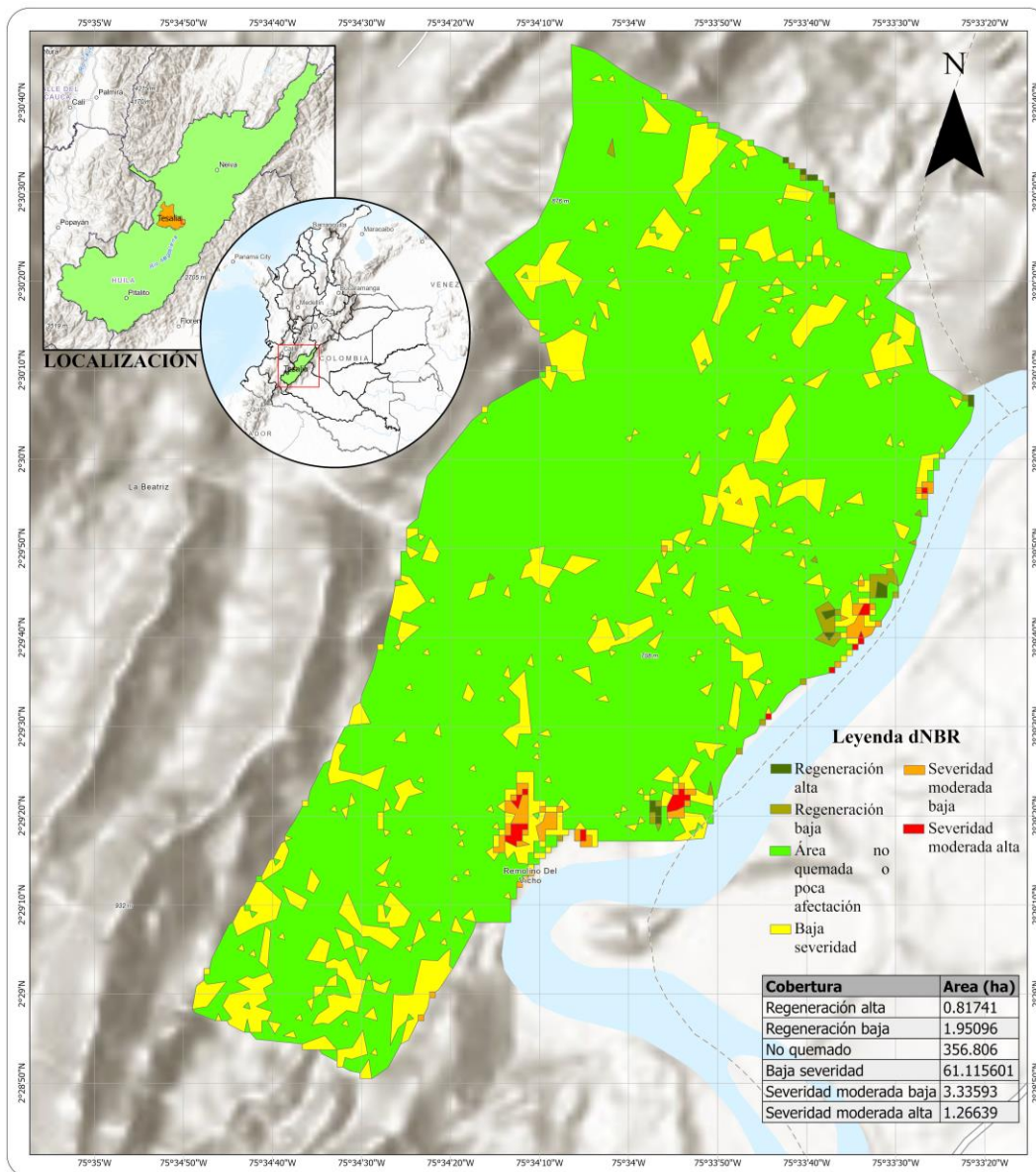
Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Severidad moderada a alta	1.2	0.3
Severidad moderada a baja	3.3	0.8
Baja severidad	61.5	14.4
Área no quemada o con poca afectación	356.8	83.9
Regeneración baja	1.9	0.4
Regeneración alta	0.8	0.2
Total	425.1	100%

De acuerdo con los resultados del índice dNBR, la categoría “Área no quemada o con poca afectación” representó la mayor proporción del área evaluada, con un 83%, seguida por “Baja severidad”, con un 14%. Estas dos clases constituyen las coberturas predominantes dentro de la reserva, reflejando una baja afectación generalizada por el incendio. En contraste, las categorías “Regeneración baja” y “Regeneración alta” presentaron una menor participación en el total del área. Este patrón puede explicarse por el hecho de que, si bien el incendio cubrió una porción considerable del territorio —como se evidenció en los resultados del NBR post-incendio— su severidad no fue alta en términos ecológicos.

Las consecuencias del evento no fueron tan intensas, lo que sugiere que la vegetación no sufrió daños críticos. Esto puede atribuirse a que el incendio no tuvo una duración prolongada, lo cual permitió que los ecosistemas conservaran una mayor capacidad de resiliencia. Lo mencionado anteriormente se puede evidenciar a continuación (Véase Anexo 5).

Figura 7.

Mapa de cálculo del dNBR



Anexo 5. Mapa del Cálculo del dNBR (Diferencial del Índice nomralizado de Quema)		Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Universidad de Manizales Facultad de Ciencias e Ingeniería	 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA	Escala: 1:8,000  0 0.1 0.2 0.4 0.6 Km Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, NASA, NGA, USGS; PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS; PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS, US Census Bureau, Esri, USGS; Grupo Ingeolan C.A., PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS
		Referencia Espacial GCS WGS 1984 GCS: GCS WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326	

7.2.4 Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada pre-incendio

A partir del cálculo del NDVI se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10.

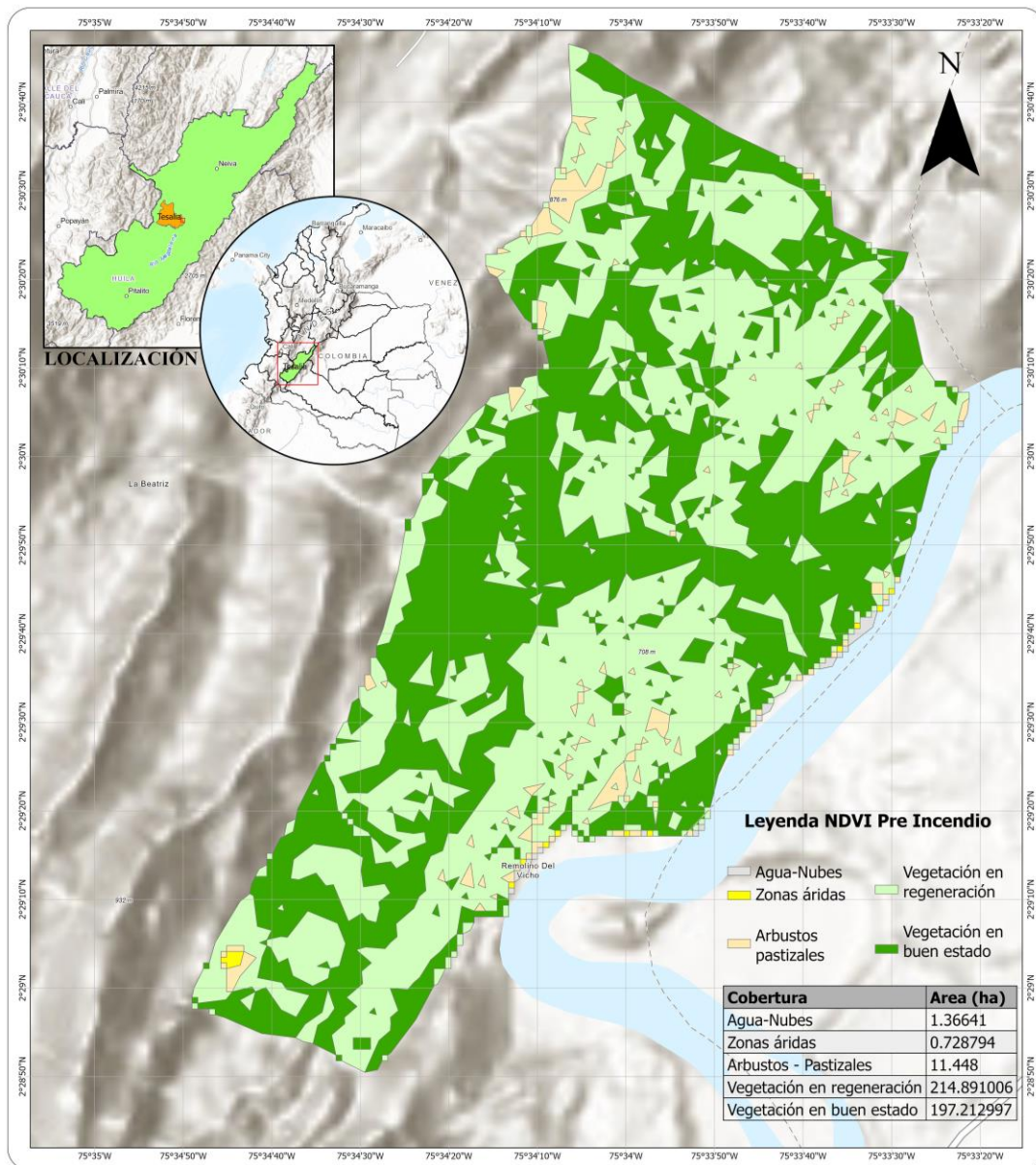
Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada pre incendio




Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agua-Nubes	1.3	0.3
Zonas áridas	0.7	0.2
Arbustos - Pastizales	11.4	2.7
Vegetación en regeneración	214.8	50.5
Vegetación en buen estado	197.2	46.4
Total	425.1	100

La cobertura que más predomina es “Vegetación en regeneración” con un 50% del total del área de interés, seguido de “Vegetación en buen estado” con un 46%, estas dos coberturas son las más representativas de toda la reserva en el evento pre incendio, lo cual es congruente con lo evidenciado en los anteriores índices, ya que antes del incendio las coberturas no tenían afectaciones por incendios, si no por el contrario gran parte de la reserva se encontraba en un buen estado de conservación. Esto se puede evidenciar a continuación (Véase Anexo 6).

Figura 8.

Mapa de cálculo del NDVI índice de vegetación de diferencia normalizada pre-incendio



Anexo 6. Mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) Pre Incendio		Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Facultad de Ciencias e Ingeniería	Escala: 1:8,000 	
		Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, NASA, NGA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS, PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS, US Census Bureau, Esri, USGS, Grupo Ingelcan C.A., PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS	
		Referencia Espacial GCS WGS 1984 GCS: GCS WGS 1984 Datum: WGS 1984 Unidad: Grados EPSG 4326	

72.5 Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada post incendio

A partir del cálculo del NDVI post incendio se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11.

Resultados Cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada post incendio

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agua-Nubes	0.6	0.1
Zonas áridas	0.7	0.2
Arbustos - Pastizales	32.2	7.6
Vegetación en regeneración	274.6	64.5
Vegetación en buen estado	117.2	27.6
Total	425.1	100

Para el caso del índice NDVI post incendio se tiene que la cobertura con mayor área es “Vegetación en regeneración” con un 64%, seguido de “Vegetación en buen estado”, esto se relaciona directamente con lo evidenciado en el diferencial del índice normalizado de quema, donde se identificó que a pesar de que el incendio se extendió en el área no tuvo una alta severidad por su “corta” duración, lo que causó que la vegetación no se afectara en gran medida si no que por el contrario pudo empezar su proceso de recuperación de una forma más rápida, por lo que en el NDVI las coberturas dominantes son vegetación en regeneración y en buen estado.

La comparación entre los resultados del índice NDVI antes y después del incendio muestra una dinámica particular en las coberturas vegetales. Se observa un aumento del 14% en el área ocupada por vegetación en regeneración, mientras que la vegetación en buen estado presentó una disminución del 16%. Este comportamiento sugiere que, aunque el incendio impactó el área de estudio, no lo hizo con una severidad crítica, lo cual coincide con los análisis previos realizados con los índices NBR y NBR. En el caso del NBR post-incendio, la cobertura predominante fue

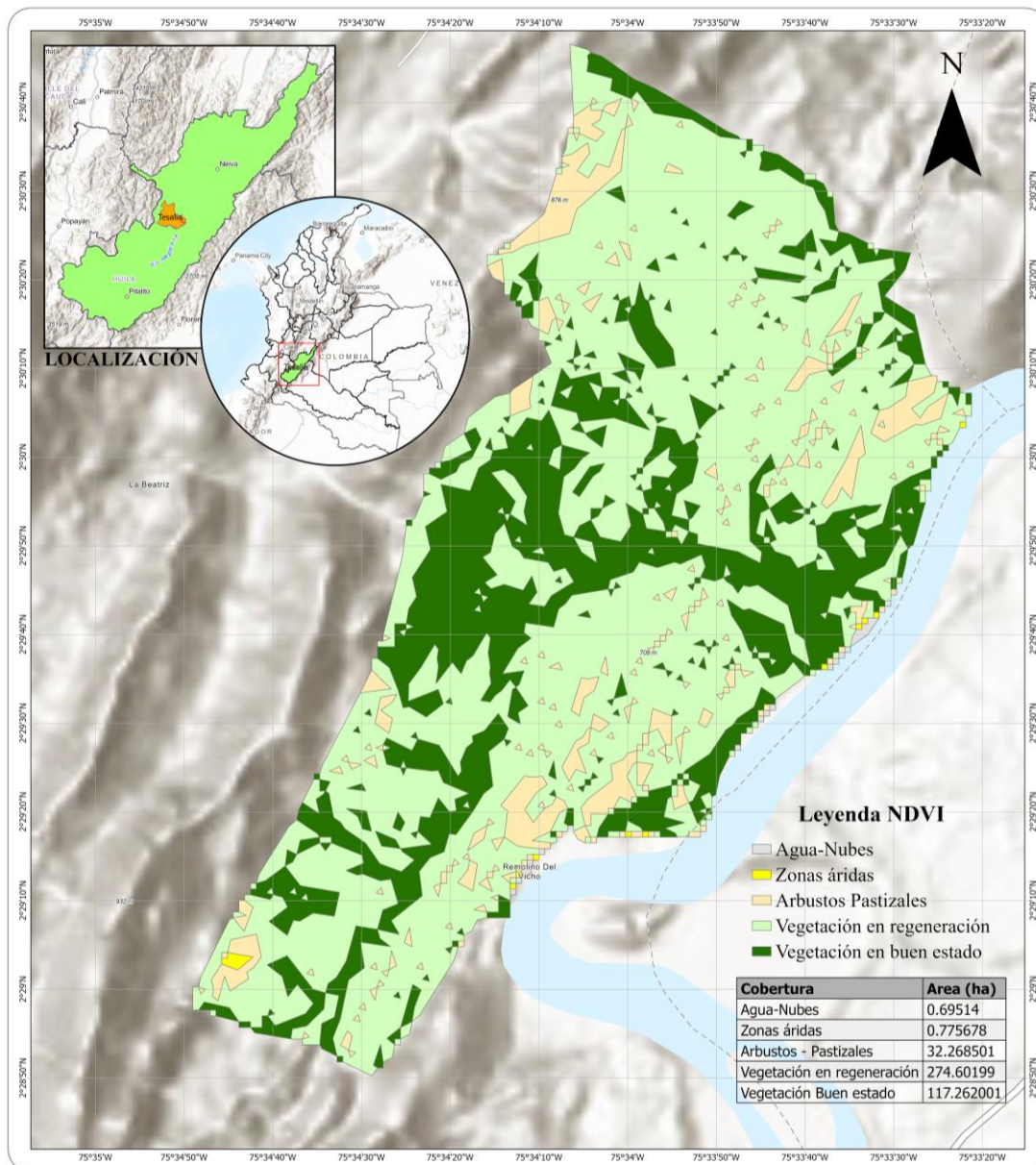
“Zonas quemadas”, pero los valores del NBR mostraron que gran parte del área se clasificó como “No quemado o con poca afectación” (83%) y “Baja severidad” (14%). Esto indica que, si bien el incendio se extendió espacialmente, su impacto ecológico fue bajo.

El ligero cambio en las coberturas de NDVI puede explicarse por la rápida capacidad de respuesta del ecosistema, particularmente en zonas de bosque seco tropical, donde la vegetación ha desarrollado mecanismos de resiliencia frente a disturbios frecuentes. La corta duración del incendio permitió que muchas especies vegetales iniciaran su proceso de recuperación poco tiempo después del evento, lo cual se refleja en el aumento de la vegetación en regeneración en el NDVI post-incendio.

Para resumir, la información derivada de los índices NDVI, NBR y NBR permite concluir que el evento de incendio, aunque amplio en cobertura, tuvo una baja severidad y alta posibilidad de recuperación natural, lo cual es consistente con la alta proporción de vegetación en regeneración evidenciada en las etapas posteriores (Véase Anexo 7).

Figura 9.

Mapa de cálculo del NDVI índice de vegetación de diferencia normalizada post incendio



<p>Anexo 7. Mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) Post Incendio</p>		<p>Elaborado por: Nicolás Becerra - Ing. Forestal Diego Atilano - Ing. Forestal</p>	
 Municipio Tesalia Departamento Huila	 UNIVERSIDAD DE MANIZALES Facultad de Ciencias e Ingeniería	<p>Escala: 1:8,000</p> 	
		<p>Créditos: Imagen Satelital: SENTINEL 2 - Copernicus Mapas Base: Esri, NASA, NGA, USGS; PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS; PNNC, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS, US Census Bureau; Esri, USGS; Grupo Ingeolan C.A., PNNC, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS</p>	

8 Discusión

El análisis comparativo entre los resultados de la clasificación supervisada y los obtenidos a partir de los índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) en la Reserva Forestal El Viche permitió identificar patrones de afectación y recuperación vegetal coherentes con lo reportado en la literatura científica reciente. La mayor parte del área afectada correspondió a zonas con cobertura de arbustal y vegetación secundaria, lo cual explica una menor severidad del daño, dado que estas coberturas presentan menor carga de material vegetal y contenidos inflamables características de especies de bosque seco tropical. Entre las posibles causas del incendio se identifican las prácticas agropecuarias con uso de fuego no controlado, sumadas a condiciones climáticas adversas como altas temperaturas y baja humedad relativa durante la segunda temporada seca del 2023.

Los efectos más evidentes incluyeron la pérdida de cobertura vegetal y la fragmentación de hábitats, aunque se observó una rápida regeneración en algunas zonas, atribuida a la resiliencia propia del bosque seco tropical. Esta metodología permite no solo validar los hallazgos, sino también evaluar su aplicabilidad en ecosistemas frágiles como este. En cuanto a medidas de mitigación, el análisis respalda la necesidad de fortalecer sistemas de monitoreo satelital, establecer alertas tempranas y promover prácticas productivas sostenibles que reduzcan la ocurrencia de incendios, así como estrategias de restauración ecológica en áreas con regeneración lenta.

Según la clasificación temática, más del 54% del área fue identificada como quemada. Sin embargo, el índice dNBR mostró que el 83,9% del territorio presentó baja o nula afectación, lo que podría interpretarse como una subestimación del impacto visual detectado. Esta discrepancia se explica, en parte, por la baja densidad de cobertura vegetal en áreas con regeneración secundaria, las cuales suelen mostrar menor contraste espectral después de un incendio.

Este fenómeno ya ha sido documentado por Ariza, A. (2018) quienes indican que el dNBR es más sensible a cambios drásticos en la estructura del dosel, lo que puede limitar su precisión en ecosistemas abiertos o intervenidos. En ese sentido, los valores bajos de severidad en el dNBR no necesariamente contradicen la clasificación supervisada, sino que reflejan una diferencia metodológica en la forma de evaluar el daño.

Lo anteriormente descrito concuerda con lo reportado por Sánchez-Tapia et al. (2020), quienes demostraron que han demostrado que la composición del paisaje previo al incendio influye directamente en la respuesta espectral del ecosistema. En zonas dominadas por vegetación secundaria o arbustal, como ocurre en El Viche, los índices espectrales suelen subestimar la afectación si esta no implica una pérdida abrupta de biomasa. En la Reserva El Viche, donde predomina una matriz de vegetación en regeneración, este fenómeno se reflejó en el bajo contraste espectral post-incendio captado por el dNBR.

Respecto al índice NDVI, los resultados también respaldan esta interpretación: el 64.5% del área fue clasificada como vegetación en regeneración y el 27.6% como vegetación en buen estado. Esto demuestra, que el NDVI es una herramienta útil no solo para detectar afectación, sino también para hacer seguimiento de procesos de regeneración post-incendio, especialmente en ecosistemas de alta estacionalidad como el bosque seco tropical.

Además, los resultados de severidad obtenidos mediante el NBR post-incendio evidenció que un 51% del área presentaba severidad moderada a baja, y un 24% baja severidad, lo que sugiere que el incendio fue extenso, pero no necesariamente intenso. Este comportamiento ha sido documentado en estudios internacionales como el de Roy et al. (2021), quienes explican que la severidad del fuego puede ser mitigada por factores como la duración del evento o la discontinuidad del combustible vegetal.

En contraste con los antecedentes en Colombia, donde estudios como el de Ramírez et al. (2020) en Chingaza y González et al. (2021) en los Cerros Orientales evidencian una mayor severidad del daño en ecosistemas más densos o menos intervenidos, los resultados en El Viche destacan que, en contextos de vegetación fragmentada o secundaria, la afectación puede ser amplia en cobertura, pero no necesariamente crítica en términos de severidad ecológica.

Este trabajo también respalda las conclusiones de Schroeder et al. (2016) y Mallinis et al. (2018), quienes recomiendan la integración de clasificación supervisada con índices espectrales para mejorar la detección y validación de áreas afectadas. En el presente estudio, esta metodología permitió una lectura complementaria: la clasificación supervisada fue más precisa para delimitar

especialmente las áreas quemadas, mientras que los índices espectrales permitieron interpretar la intensidad y el estado de la vegetación en una escala continua.

Para concluir, los resultados de este objetivo no solo validan las herramientas utilizadas, sino que además confirman lo planteado por la literatura: en ecosistemas como el bosque seco tropical, la respuesta espectral al fuego puede ser matizada y depende de factores estructurales, climáticos y de manejo del paisaje. Por tanto, la combinación de enfoques cuantitativos (como los índices espectrales) y cualitativos (clasificación temática supervisada) resulta esencial para la evaluación efectiva de eventos de incendio, especialmente en regiones poco estudiadas como el sur del Huila.

9 Conclusiones

A partir del desarrollo de los tres objetivos propuestos, se concluye que el incendio forestal ocurrido en octubre de 2023 en la Reserva Forestal “El Viche”, ubicada en el municipio de Tesalia (Huila), tuvo un impacto considerable sobre la cobertura vegetal, afectando principalmente áreas dominadas por arbustal denso y bosque abierto, elementos característicos del ecosistema de bosque seco tropical (BST).

La clasificación supervisada evidenció que más del 54% del área analizada fue clasificada como zona quemada, reflejando una alteración significativa en la estructura del paisaje respecto al escenario pre-incendio. Esta afectación puede atribuirse, en parte, a factores antrópicos como el uso del fuego para prácticas agrícolas no controladas, sumados a condiciones climáticas críticas durante la segunda temporada seca del año (altas temperaturas, baja humedad relativa y vientos).

La evaluación multitemporal mediante los índices NDVI, NBR y dNBR permitió complementar y profundizar el análisis del evento. El índice NDVI mostró que un 64.5% del área se encuentra en etapa de regeneración, lo cual sugiere una respuesta positiva del ecosistema. Esto puede explicarse por la baja intensidad del fuego y por la resiliencia ecológica del BST, especialmente en áreas con vegetación secundaria. En la misma línea, los índices NBR y dNBR indicaron severidades bajas o moderadas en la mayoría del territorio, lo que refuerza la hipótesis de que el incendio, aunque amplio en superficie, no alcanzó niveles críticos de intensidad.

Reportes locales indican que el incendio fue controlado en un corto periodo de tiempo, lo que limitó sus efectos más profundos sobre el sotobosque y el dosel arbóreo. En incendios de corta duración, el daño suele concentrarse en la hojarasca, material herbáceo y regeneración temprana, sin comprometer completamente las funciones estructurales del ecosistema (Fernández-Manso et al., 2016). Esto se refleja en los valores del NBR, donde el 83.9% del área presentó poca o nula afectación.

La comparación entre la clasificación supervisada y los índices espectrales mostró un alto grado de coherencia metodológica. La clasificación permitió delimitar espacialmente las zonas

afectadas, mientras que los índices ofrecieron una lectura más detallada del grado de daño y del estado de recuperación. Esta integración metodológica fortaleció el análisis integral del impacto del fuego sobre el paisaje.

Desde una perspectiva ecológica, los resultados revelan la vulnerabilidad del BST frente a perturbaciones como el fuego, pero también su capacidad de resiliencia, especialmente en paisajes fragmentados con vegetación en regeneración. Sin embargo, se advierte que la recurrencia de eventos como este, en conjunto con presiones antrópicas como la expansión agrícola, el pastoreo extensivo y el cambio climático, podrían comprometer la estabilidad ecológica de la Reserva si no se adoptan estrategias preventivas y restaurativas.

Este estudio ofrece una línea base técnica para el monitoreo de incendios forestales en áreas protegidas del BST colombiano. Además, aporta una metodología replicable para análisis de severidad y regeneración post-incendio, que puede apoyar procesos de planificación ambiental, restauración ecológica y toma de decisiones por parte de las autoridades competentes.

10 Recomendaciones

Diseñar e implementar un sistema de alerta temprana para incendios forestales en zonas de bosque seco tropical (BST), utilizando imágenes satelitales de alta resolución como Sentinel-2 o PlanetScope. Este sistema debería integrarse a plataformas institucionales existentes como las del IDEAM o las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), mediante el monitoreo periódico de índices espectrales como el NBR y el NDVI. La alerta se activaría automáticamente al detectar cambios abruptos en estos índices, indicando posibles focos de incendio o áreas en riesgo. Esta información permitiría a las autoridades ambientales priorizar patrullajes, emitir alertas locales, o planificar acciones de control y mitigación en tiempo casi real.

Priorizar la restauración ecológica en zonas con severidad moderada-alta (identificadas por el NBR), enfocándose en especies nativas resilientes al fuego, como *Prosopis juliflora* o *Capparis odoratissima*, propias del BST del departamento del Huila (Pizano et al., 2016).

Desarrollar talleres participativos con la Asociación de Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC) del municipio de Tesalia, para socializar los resultados del estudio y promover prácticas agroforestales que reduzcan el riesgo de incendios (ej. cortafuegos naturales con cultivos de bajo inflamabilidad).

Crear brigadas comunitarias capacitadas en manejo básico de incendios, en colaboración con el Cuerpo de Bomberos del municipio de Tesalia y la Alcaldía Municipal. Profundizar en la validación de índices espectrales mediante estudios que combinen imágenes satelitales con datos in situ (ej. parcelas permanentes para medir regeneración post-incendio), replicando la metodología en otros BST del valle del Magdalena.

Realizar campañas de sensibilización y encuestas a actores locales para identificar causas antrópicas de incendios (ej. quemas agrícolas no controladas) y diseñar estrategias de prevención de incendios forestales, el uso responsable del territorio y la importancia de conservar estos ecosistemas estratégicos.

Referencias

- Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección*, (49), 49–61.
- Ariza, A. (2018). Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales en Colombia. Tesis doctoral. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Armenteras, D., & Rodríguez, N. (2015). Dinámica espacial de incendios forestales en Colombia. *Revista de Geografía Norte Grande*, 25-41.
- Bastarrika, A., Alvarado, M., Artemov, I., & Chuvieco, E. (2014). Burned area mapping: A review of current techniques and future directions. *Remote Sensing*.
- Beltrán, J., & Sierra, M. (2016). Estrategias de restauración ecológica en áreas afectadas por incendios forestales. *Revista de Ecología Aplicada*, 13(2), 45-58.
- Chavez , A. (2020). Aplicaciones de sensores remotos en la detección de incendios en bosques secos. *Boletín Científico de la Universidad Nacional*, 45-63.
- Cocke, A. E., Fule, P. Z., & Crouse, J. E. (2005). Comparison of burn severity assessments using differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 189-198.
- Correa, H., & Rangel, J. O. (2013). Efectos de los incendios en la diversidad florística del bosque seco tropical. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 17(1), 33-47.
- Cortés, J., Morales, A., & Vega, L. (2019). Evaluación de la severidad de incendios mediante dNBR en Cundinamarca. *Revista Colombiana de Geografía*, 28(2), 77-93.
- Epting, J., Verbyla, D., & Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 328-339.
- Fernández, N., Castro, A., & Parra, J. (2023). Integración de datos de campo y teledetección para el monitoreo de la recuperación post-incendio en bosques tropicales secos. *Ecosistemas*, 45-58.
- Galindo, C., Herrera, L., & Muñoz, F. (2021). Relación entre actividades antrópicas y recurrencia de incendios forestales en el Valle del Cauca. *Avances en Recursos Naturales*, 9(1), 88-101.

- Gámez, F. E., & Martínez, H. (2018). Biodiversidad y conservación del bosque seco tropical en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Giglio, L. (2018). Global patterns of burned area using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 78-85.
- Gobernación del Huila. (2023, septiembre 26). Persisten los incendios forestales en el departamento del Huila. Gobernación del Huila. <https://www.huila.gov.co/publicaciones/14340/persisten-los-incendios-forestales-en-el-departamento-del-huila/>
- Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2022). Optical remotely sensed time series data for forest disturbance detection: A review. *International Journal of Remote Sensing*.
- Gómez, R., Parra, D., & Sánchez, E. (2020). Influencia del fenómeno El Niño en la ocurrencia de incendios forestales en Boyacá. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 115-132.
- González, G. P., Capador, Y. E., & Suárez, P. A. (2021). Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia). *Avances Investigación en Ingeniería*, 87-101.
- Instituto Alexander von Humboldt (IAVH). (2016). El bosque seco tropical en Colombia. Bogotá: IAVH.
- Joulin, A., Grave, E., Mikolov, T., & Ranzato, M. A. (2021). Bag of tricks for efficient text classification. *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Volume 1*.
- Jones, A., Smith, B., & Taylor, C. (2024). Sentinel-2 based burn severity mapping and assessing post-fire impacts. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*.
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126.
- Lee, K., Leeuwen, W., Gillan, J., & Falk, D. (2024). Examining the Impacts of Pre-Fire Forest Conditions on Burn Severity Using Multiple Remote Sensing Platforms. *Remote Sensing*.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. Wiley.
- Liu, P., Zhuang, W., Kou, W., Wang, L., Wang, Q., & Deng, Z. (2025). Fire Severity Outperforms Remote Sensing Indices in Exploring Post-Fire Vegetation Recovery Dynamics in Complex Plateau Mountainous Regions. *Forests*, 16(2), 263.

- López, J. S., Caraballo, D. J., & García, S. P. (2017). Monitoring natural hazards in urban areas using remote sensing data. *Natural Hazards*, 12-29.
- López, F., & Guzmán, M. (2018). Monitoreo de áreas afectadas por incendios forestales en el Tolima usando NDVI. *Revista Ecosistemas*, 27(3), 65-74.
- López, M. A., & Martínez, J. D. (2019). Aplicación de técnicas de clasificación supervisada para la detección de áreas quemadas en el Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena. *Revista de Geografía Norte Grande*, 125-142.
- Mallinis, G., Koutsias, N., Christopoulou, O., & Vasilakos, C. (2018). Evaluating the performance of spectral indices for fire severity assessment in a Mediterranean environment using Sentinel-2 and Landsat 8 imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 1-18.
- Martínez, A. (2017). Transformaciones en el uso del suelo y su relación con la degradación ambiental en el Huila. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21(1), 123-139.
- MinAmbiente . (2020). Programa Nacional para la Conservacion y Restauracion del Bosque Seco Tropical en Colombia. Bogotá: IAVH.
- MinAmbiente, & IAVH. (2014). Bosque Seco Tropical. Bogotá: IAVH.
- Pacheco, C., & Restrepo, J. (2019). Modelos predictivos para la ocurrencia de incendios en Colombia. *Ecología Aplicada*, 89-105.
- Pérez, F., & Álvarez, M. (2022). Impacto de los incendios forestales en el bosque seco tropical colombiano. *Revista Colombiana de Ecología*, 300-315.
- Pizano, C., González, M. R., López, R., Jurado, R. D., Cuadros, H., Castaño Naranjo, A., . . . García, H. (2016). El Bosque Seco Tropical en Colombia. Bogotá: IAVH. Obtenido de <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2015/cap2/202/#seccion6>
- Ramírez, J. M., Arboleda, A., & Vélez, J. (2020). Evaluación de la severidad de incendios forestales utilizando índices espectrales en el Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia. *Revista de Teledetección*, 1-14.
- Rodríguez, E. P., & Gómez, J. L. (2021). Incendios forestales y sus efectos sobre la biodiversidad en Colombia. Bogotá: Ecoambiental.
- Rodríguez, J., Ramírez, A., & Díaz, C. (2015). Cartografía de cicatrices de incendios forestales en el Caribe colombiano. *Geografías*, 5(1), 99-112.
- Rodríguez, H. (2020). Efectos del fuego en la regeneración del bosque seco tropical. *Biodiversity and Conservation*, 3193 - 3120.

- Roy, D. P. (2019). Satellite-based assessment of fire impacts worldwide. *Global Change Biology*, 887-903.
- Sánchez-Tapia, A., Blanco, Y., & Rodríguez, L. (2019). Regeneración natural del bosque seco tropical tras incendios en el Caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ecología*, 23(1), 11-25.
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., Quayle, B., Lorenz, E., & Morelli, F. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, 210-220.
- Sing, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 989.
- Smith, A. M. S., Sparks, A. M., Kolden, C. A., Abatzoglou, J. T., Talhelm, A. F., Johnson, D. M., ... & Boschetti, L. (2016). Towards a new paradigm in fire severity research using remote sensing. *Earth-Science Reviews*, 162, 333-348.
- Smith, J., & Doe, R. (2024). Integrating Remote Sensing and Field Data for Enhanced Post-Fire Severity Assessment. *Journal of Wildland Fire Science*.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 127-150.
- Yebra, M., & Fernández-Manso, A. (2013). Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174-175, 61-70.
- Zahura, F. T., Bisht, G., Li, Z., McKnight, S., & Chen, X. (2024). Impact of Topography and Climate on Post-fire Vegetation Recovery Across Different Burn Severity and Land Cover Types through Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2404.16834*.
- Zhang, Y., Xie, Y., & Li, Z. (2020). Vegetation Index: A Comprehensive Review and Its Application in Ecosystem Studies. *Remote Sensing*.

Anexos

- Anexo 1. Mapa de clasificación supervisada pre incendio
- Anexo 2. Mapa de clasificación supervisada Post incendio
- Anexo 3. Mapa de cálculo del NBR (Índice Normalizado de Quema) pre incendio
- Anexo 4. Mapa de cálculo del NBR (índice normalizado de quema) post incendio
- Anexo 5. Mapa de cálculo del dNBR (Diferencial del índice normalizado de quema)
- Anexo 6. Mapa de cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada pre incendio
- Anexo 7. Mapa de cálculo del NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada post incendio
- Anexo 8. Mapa de ubicación de la Reserva Forestal “El Viche.