

Riesgo de incendios forestales en el páramo andino de Navag, provincia de Chimborazo: perspectivas para la conservación y uso sostenible

Forest fire risk in the andean páramo of Navag, Chimborazo province: perspectives for conservation and sustainable use

Bryan José Ordoñez Bustamante
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
bjoseob1997@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-7841-9192>

Marco Vinicio Rodríguez Llerena*
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
mvrodriguez@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2492-2969>

***Correspondencia:**
mvrodriguez@unach.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Ordoñez, B., & Rodríguez, M. (2026). Riesgo de incendios forestales en el páramo andino de Navag, provincia de Chimborazo: perspectivas para la conservación y uso sostenible. *Esprint Investigación*, 5(2), 108-140. <https://doi.org/10.61347/ei.v5i2.353>

Recibido: 11 de junio de 2026

Aceptado: 16 de julio de 2026

Publicado: 22 de julio de 2026

Resumen: Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas para los ecosistemas altoandinos, debido a sus efectos sobre la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad. El objetivo de esta investigación fue analizar el riesgo de incendios forestales en el páramo de Navag, provincia de Chimborazo, Ecuador, mediante la integración espacial de variables de amenaza y vulnerabilidad, con el propósito de formular estrategias orientadas a la conservación y al uso sostenible de este ecosistema. La metodología se sustentó en una evaluación multicriterio apoyada en sistemas de información geográfica (SIG), que incorporó variables climáticas precipitación y temperatura, topográficas pendiente, cobertura vegetal y focos de calor para estimar la amenaza, así como componentes ecológicos, sociales, funcionales e institucionales para determinar la vulnerabilidad. La integración de ambas dimensiones permitió generar mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. La correspondencia espacial del modelo se evaluó mediante la superposición de los registros históricos de incendios sobre las categorías de riesgo obtenidas. Los resultados evidenciaron que las categorías alta y muy alta se concentraron en los sectores occidental, suroccidental y suroccidental del páramo, caracterizados por menores niveles de precipitación, pendientes pronunciadas, coberturas vegetales transformadas por actividades agropecuarias y una mayor presión antrópica. A partir de la zonificación se formularon estrategias diferenciadas de prevención, preparación, respuesta y restauración ecológica. Se concluyó que la integración de la amenaza y la vulnerabilidad proporcionó una evaluación espacial integral del riesgo y generó información técnica para la planificación territorial, la priorización de intervenciones y la gestión sostenible del páramo de Navag.

Palabras clave: Amenaza, gestión de riesgos, incendios forestales, páramo altoandino, Sistemas de Información Geográfica, vulnerabilidad.

Abstract: Wildfires constitute one of the main threats to high Andean ecosystems because of their effects on water regulation, carbon storage, and biodiversity conservation. This study aimed to analyze wildfire risk in the Navag Andean páramo, Chimborazo Province, Ecuador, by spatially integrating hazard and vulnerability variables to formulate strategies for the conservation and sustainable use of this ecosystem. The methodology was based on a multicriteria evaluation supported by geographic information systems (GIS). Climatic variables, including precipitation and temperature, topographic conditions such as slope, vegetation cover, and thermal hotspots were incorporated to estimate wildfire hazard, while ecological, social, functional, and institutional components were considered to determine vulnerability. The integration of both dimensions enabled the generation of hazard, vulnerability, and risk maps. The spatial correspondence of the model was assessed by overlaying historical wildfire records on the resulting risk categories. The results showed that high and very high risk categories were concentrated in the western, southwestern, and southeastern sectors of the páramo. These areas were characterized by lower precipitation levels, steep slopes, vegetation cover transformed by agricultural activities, and greater anthropogenic pressure. Based on the resulting zoning, differentiated prevention, preparedness, response, and ecological restoration strategies were formulated. It was concluded that integrating hazard and vulnerability provided a comprehensive spatial assessment of wildfire risk and generated technical information to support territorial planning, intervention prioritization, and the sustainable management of the Navag páramo.

Keywords: Geographic Information Systems, hazard, risk management, high-andean páramo, vulnerability, wildfires.

Copyright: Derechos de autor 2026 Bryan José Ordoñez Bustamante, Marco Vinicio Rodríguez Llerena.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen una de las amenazas más críticas para los ecosistemas de páramo, debido a su elevada sensibilidad frente a las alteraciones ambientales y antrópicas (Sarango-Cobos et al., 2019; Zhiminaicela et al., 2021). En este contexto, el riesgo de incendios forestales se entiende como el resultado de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad del sistema socioecológico (Parra-Lara et al., 2025; Ríos, 2023). La amenaza se relaciona con las condiciones climáticas, biofísicas y antrópicas que favorecen la ocurrencia y propagación del fuego. Por su parte, la vulnerabilidad comprende la exposición, la sensibilidad y la capacidad de respuesta y recuperación del territorio frente a estos eventos.

Los páramos desempeñan un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos, entre los que destacan la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad. Estas funciones los convierten en territorios estratégicos para la sostenibilidad ambiental y la adaptación frente al cambio climático (Bustamante et al., 2011; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023a).

Los incendios forestales provocan la pérdida y transformación de la cobertura vegetal, además de modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Estas alteraciones pueden reducir su capacidad de retención hídrica, afectar el contenido de materia orgánica y promover la liberación de carbono a la atmósfera (Camargo-García et al., 2012; Sarango-Cobos et al., 2019; Zhiminaicela et al., 2021). Asimismo, el fuego puede alterar la composición, la diversidad funcional y los procesos de recuperación de la vegetación altoandina. Estos efectos comprometen la estabilidad ecológica y la continuidad de los servicios ecosistémicos proporcionados por el páramo (Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023).

Las investigaciones desarrolladas a escala regional han identificado que las actividades antrópicas, como la expansión de la frontera agropecuaria, la quema de pajonales y las deficiencias en las medidas de prevención y control, constituyen factores asociados con la ocurrencia de incendios (Carrasco & Núñez, 2019; Misacango, 2022; Ríos, 2023).

A estas condiciones se suman las sequías prolongadas, las variaciones en los patrones de precipitación, el incremento de la temperatura y la presencia de vientos fuertes. La interacción de estos factores reduce la humedad del combustible vegetal y favorece la rápida propagación del fuego. En Ecuador, esta problemática adquiere especial relevancia debido al incremento registrado en el número de eventos y en la superficie afectada durante los últimos años (Ríos, 2023; Zhiminaicela et al., 2021).

En 2016 se identificaron 54 incendios forestales en la provincia de Chimborazo, de los cuales 14 ocurrieron en el cantón Colta, donde se localiza el páramo de Navag (Cisneros-Vaca et al., 2023). Durante el período 2018–2020, la provincia de Chimborazo registró una superficie afectada de 5.155,76 ha, situándose entre las provincias ecuatorianas con mayor afectación por incendios forestales (Villacís et al., 2022). En 2024 se reportaron 5.693 incendios a escala nacional, de los cuales 407 ocurrieron en Chimborazo, equivalentes al 7,13 % del total (Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2024).

En el ámbito local, el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Colta reconoce la importancia ambiental y territorial de los ecosistemas de páramo, así como la necesidad de fortalecer su conservación y gestión (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD Colta], 2023). Desde una perspectiva científica, la evaluación del riesgo de incendios forestales ha evolucionado hacia enfoques integradores que combinan análisis temporal y espacial, evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica (SIG). Estas herramientas permiten integrar variables heterogéneas y representar territorialmente los diferentes niveles de amenaza y vulnerabilidad.

El empleo de modelos multicriterio facilita la identificación de áreas críticas y el análisis conjunto de factores climáticos, topográficos, biofísicos y antrópicos. Además, proporciona información técnica para orientar la prevención, la gestión territorial y la asignación de recursos en las zonas prioritarias (Parra-Lara et al., 2025). Sin embargo, persisten vacíos metodológicos relacionados con la integración de las dimensiones ecológica, social e institucional del riesgo en ecosistemas de páramo. Gran parte de los análisis se concentra en la amenaza o susceptibilidad al fuego, sin evaluar de manera explícita las posibles consecuencias sobre el territorio y su capacidad de recuperación.

Esta limitación evidencia la necesidad de desarrollar modelos que integren variables de amenaza y vulnerabilidad, considerando las características particulares de los ecosistemas altoandinos. La incorporación conjunta de ambos componentes permite obtener una representación más completa del riesgo de incendios forestales. En este sentido, el estudio busca generar evidencia científica que contribuya al diseño de estrategias de prevención, conservación y gestión sostenible del páramo de Navag. El análisis permite identificar factores críticos, establecer relaciones entre procesos ecológicos y sociales, y priorizar espacialmente las áreas que requieren intervención.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación es analizar el riesgo de incendios forestales en el páramo andino de Navag, provincia de Chimborazo, mediante la integración espacial de variables de amenaza y vulnerabilidad, con el propósito de formular estrategias diferenciadas de prevención, manejo, conservación y uso sostenible del ecosistema.

2. Metodología

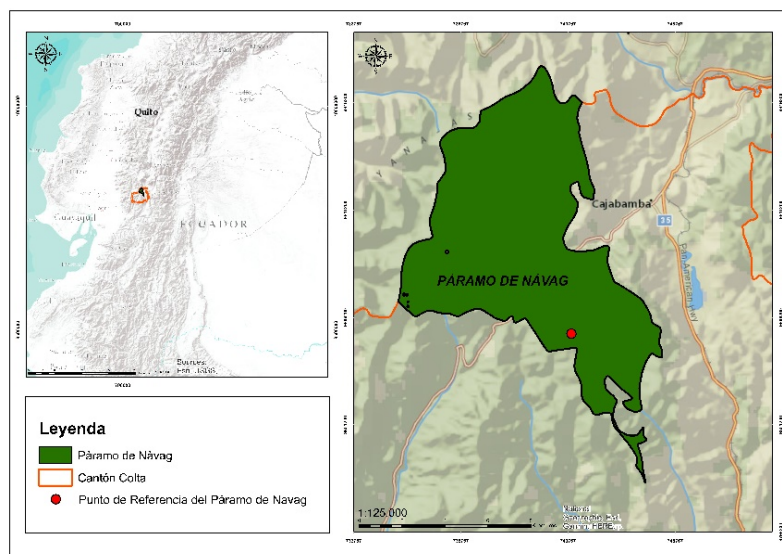
Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en el páramo andino de Navag, localizado en el cantón Colta, provincia de Chimborazo, Ecuador, en las coordenadas 1° 45' 32" S y 78° 48' 27" O (figura 1) (Bustamante et al., 2011; Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD Colta], 2023). La delimitación del área de estudio se efectuó mediante herramientas de sistemas de información geográfica. Como resultado, se identificó una superficie de 11.218 ha, con un rango altitudinal comprendido entre 3.080 y 4.280 m s. n. m. y una temperatura que osciló entre 8 y 14 °C (GAD Colta, 2023).

La zona constituyó una importante fuente de regulación hídrica para las comunidades y los centros poblados ubicados en la cuenca baja, debido a la capacidad de los ecosistemas de páramo para captar, almacenar y distribuir el agua (Bustamante et al., 2011; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023a). Durante el período analizado, el páramo de Navag estuvo sometido a una creciente presión antrópica derivada de actividades agropecuarias, entre ellas la quema de pajonales para la renovación de pastizales. A estas condiciones se añadió la variabilidad climática, factores que incrementaron la susceptibilidad del territorio frente a los incendios forestales (Carrasco & Núñez, 2019; MAATE, 2023b; Misacango, 2022; Ríos, 2023).

Figura 1

Páramo de Navag, cantón Colta, provincia de Chimborazo - Ecuador



Enfoque metodológico

Para el análisis, se adoptó un enfoque cuantitativo sustentado en una evaluación multicriterio espacial, mediante la cual se integraron variables biofísicas y socioambientales para modelar el riesgo de incendios forestales en el ecosistema de páramo.

Cálculo del riesgo

La evaluación del riesgo se realizó mediante la integración de dos componentes fundamentales: (a) la amenaza, entendida como el conjunto de condiciones externas que favorecieron la ocurrencia y propagación de incendios forestales, y (b) la vulnerabilidad, definida como la fragilidad interna y la capacidad limitada del territorio para resistir y recuperarse de sus efectos (Ecuación 1).

$$R = \frac{A \times V}{25} \times 5 \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

R = Índice de riesgo normalizado (escala 1 – 5)

A = Índice de amenaza (1 – 5)

V = Índice de vulnerabilidad (1 – 5)

25 = valor máximo (AxV)

Índice de amenaza

El índice de amenaza de incendios forestales se construyó mediante la integración de variables climáticas, biofísicas y antrópicas, las cuales se normalizaron en una escala común de 1 a 5 para facilitar su comparación e incorporación en el modelo multicriterio.

Para el análisis de las variables climáticas, se emplearon los registros procedentes de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, cuyas características se presentan en la tabla 1. Los

datos correspondieron al período 2016–2018 (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2025).

Tabla 1

Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas

N.º	Coordenada UTM X (m)	Coordenada UTM Y (m)	Altitud (m s. n. m.)	Código	Nombre de la estación
1	746.696	9.819.450	3.220	M0393	San Juan Chimborazo
2	724.693	9.785.221	2.266	M0402	Chimbo DJ Pangor
3	722.933	9.800.123	2.800	M0404	Cañi-Limbe
4	766.449	9.800.009	2.865	M0407	Licto
5	735.559	9.797.836	3.109	M0409	Pangor Juan de Velasco H. Tepeyac
6	757.541	9.817.382	2.850	M1036	ESPOCH

Para la estimación del índice de amenaza, se consideraron cinco subfactores relacionados con las condiciones climáticas, biofísicas y antrópicas del área de estudio: (a) precipitación, (b) temperatura, (c) pendiente, (d) cobertura vegetal y (e) focos de calor. Estas variables fueron seleccionadas por su relevancia en el análisis espacial de la susceptibilidad y la amenaza de incendios forestales (Gigović et al., 2019; Jones et al., 2022).

Cada variable se reclasificó en cinco categorías de amenaza: (1) muy baja, (2) baja, (3) media, (4) alta y (5) muy alta. Posteriormente, los valores se normalizaron y se integraron en un modelo de evaluación multicriterio, conforme a la estructura presentada en la tabla 2 (Gigović et al., 2019). Las variables climáticas precipitación y temperatura y los registros de focos de calor correspondieron al período 2016–2018. Los datos meteorológicos se obtuvieron de las estaciones más próximas al área de estudio (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2025).

Los registros de focos de calor se utilizaron para caracterizar la distribución espacial y temporal de la actividad térmica potencialmente asociada con quemas o incendios. Estos datos se analizaron junto con las demás variables, debido a que un foco de calor no representó necesariamente un incendio forestal confirmado.

Las variables espaciales de carácter estructural, como la pendiente y la cobertura vegetal, se obtuvieron de la cartografía oficial más reciente disponible. Su utilización se justificó por su relativa estabilidad espacial a corto y mediano plazo. En consecuencia, estas variables se consideraron representativas de las condiciones biofísicas predominantes del territorio durante el período analizado. No obstante, su estabilidad no implicó la ausencia de modificaciones derivadas de procesos naturales o actividades antrópicas.

En particular, la cartografía de cobertura vegetal correspondió al año 2022 y se empleó ante la ausencia de una serie multitemporal homogénea para el área de estudio. Esta decisión constituyó una aproximación metodológica para representar la distribución espacial de las principales unidades de cobertura. La utilización de esta cartografía se sustentó en que las coberturas del ecosistema de páramo

suelen presentar cambios graduales, aunque pueden ser modificadas por la expansión agropecuaria y la recurrencia de incendios (Bustamante et al., 2011; Sarango-Cobos et al., 2019).

En contraste, las variables climáticas y los focos de calor presentaron una mayor variabilidad interanual y una relación temporal más directa con las condiciones favorables para la ocurrencia y propagación del fuego (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022). Por esta razón, se emplearon registros correspondientes al mismo período de análisis, con el propósito de mantener la coherencia temporal entre las variables dinámicas incorporadas en el modelo.

Ante la ausencia de evidencia empírica específica que justificara una asignación diferenciada de pesos entre los subfactores, se asignó una ponderación uniforme del 20 % a cada variable. Esta decisión evitó atribuir arbitrariamente una mayor importancia relativa a alguno de los componentes. La ponderación equitativa permitió integrar de manera balanceada los factores climáticos, biofísicos y antrópicos que conformaron el índice de amenaza. Sin embargo, los pesos asignados representaron una decisión metodológica y no una estimación empírica de la influencia real de cada variable.

Tabla 2

Criterios de evaluación y ponderación para la determinación del índice de amenaza de incendios forestales

Ítem	Variable	Criterio de evaluación	Fuente de información	Escala de valoración	Peso específico
A1	Precipitación	A menor precipitación, mayor amenaza, debido a la reducción de la humedad del suelo y del combustible vegetal.	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2025)	1 = Amenaza muy baja 2 = Amenaza baja 3 = Amenaza media 4 = Amenaza alta 5 = Amenaza muy alta	20 % (0,20)
A2	Temperatura	A mayor temperatura, mayor amenaza, debido al incremento de la evapotranspiración y la desecación del combustible vegetal.	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2025)	1 = Amenaza muy baja 2 = Amenaza baja 3 = Amenaza media 4 = Amenaza alta 5 = Amenaza muy alta	20 % (0,20)
A3	Pendiente	A mayor pendiente, mayor amenaza relativa, debido a que la inclinación del terreno puede favorecer la propagación ascendente del fuego.	Modelo digital de elevación generado a partir de la cartografía de SIGTIERRAS	1 = Amenaza muy baja 2 = Amenaza baja 3 = Amenaza media 4 = Amenaza alta 5 = Amenaza muy alta	20 % (0,20)
A4	Cobertura vegetal	A mayor disponibilidad, inflamabilidad y continuidad del combustible vegetal, mayor amenaza de propagación del fuego.	Capa de uso y cobertura vegetal de SIGTIERRAS	1 = Amenaza muy baja 2 = Amenaza baja 3 = Amenaza media 4 = Amenaza alta 5 = Amenaza muy alta	20 % (0,20)
A5	Focos de calor	A mayor número y concentración espacial de focos de calor, mayor amenaza relativa de incendios forestales.	Registros de focos de calor detectados por el sensor MODIS, obtenidos de la plataforma FIRMS de la NASA	1 = Amenaza muy baja 2 = Amenaza baja 3 = Amenaza media 4 = Amenaza alta 5 = Amenaza muy alta	20 % (0,20)
Total					100 % (1,00)

Nota. La escala de ponderación de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), aplica para todas las variables de acuerdo con los criterios establecidos.

Con el fin de integrar las variables biofísicas, se establecieron rangos específicos de clasificación y valores de ponderación para cada subfactor. Este procedimiento permitió estandarizar la información en una escala común, garantizar la comparabilidad entre las variables y facilitar su posterior integración espacial mediante un análisis multicriterio.

Los criterios de clasificación y los valores de ponderación asignados a cada subfactor se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Criterios de clasificación y ponderación para la determinación del índice de amenaza de incendios forestales

Valor	Categoría de amenaza	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Pendiente (°)	Tipo de cobertura vegetal	Focos de calor (n)
1	Muy baja	80,01–200,00	0,00–8,00	0,00–5,00	Cuerpos de agua y humedales	0
2	Baja	60,01–80,00	8,01–10,00	5,01–15,00	Bosque húmedo	1–2
3	Media	40,01–60,00	10,01–12,00	15,01–30,00	Plantaciones forestales y vegetación de páramo	3–5
4	Alta	20,01–40,00	12,01–14,00	30,01–45,00	Cultivos de altura, pasto cultivado y áreas eriales	6–9
5	Muy alta	0,00–20,00	14,01–40,00	> 45,00	Cultivo–Pasto–Bosque, Cultivo–Pasto y Bosque–Cultivo–Pasto	≥ 10

Nota. La escala de ponderación de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), aplica para todas las variables de acuerdo con los criterios establecidos.

A partir de la información generada y mediante la aplicación del análisis multicriterio, se estimó el índice de amenaza de incendios forestales. Para ello, se empleó el método de combinación lineal ponderada, que permitió integrar las variables climáticas, biofísicas y antrópicas consideradas en el modelo (Ecuación 2).

$$A = \sum_{i=1}^n W_i X_i \text{ (Ec. 2)}$$

Dónde:

A: Índice de amenaza de incendios forestales.

n: número de variables consideradas en la evaluación de la amenaza.

i=1: Indica que la suma se inicia en el primer elemento.

Wi: Peso asignado a la variable i, el cual refleja su importancia relativa en la ocurrencia y propagación de incendios forestales.

Xi: Valor estandarizado de la variable i con una escala nominal de 1 a 5.

Índice de vulnerabilidad

La vulnerabilidad frente a los incendios forestales se evaluó mediante un enfoque sistémico que integró cinco subfactores. Cada uno se reclasificó en cinco categorías ordinales, de acuerdo con los criterios presentados en la tabla 4.

Tabla 4*Reclasificación de los Sub-Factores de vulnerabilidad y asignación de pesos específicos en base al criterio técnico*

Ítem	Variable	Criterio de evaluación	Fuente de información	Escala de valoración	Peso específico
V1	Proximidad a comunidades rurales	A menor distancia entre las comunidades rurales y el páramo, mayor nivel de exposición y vulnerabilidad territorial.	SIGTIERRAS	1 = Vulnerabilidad muy baja 2 = Vulnerabilidad baja 3 = Vulnerabilidad media 4 = Vulnerabilidad alta 5 = Vulnerabilidad muy alta	20 % (0,20)
V2	Proximidad a centros poblados	A menor distancia entre los centros poblados y el páramo, mayor nivel de exposición e interacción antrópica.	SIGTIERRAS	1 = Vulnerabilidad muy baja 2 = Vulnerabilidad baja 3 = Vulnerabilidad media 4 = Vulnerabilidad alta 5 = Vulnerabilidad muy alta	20 % (0,20)
V3	Proximidad a vías de comunicación	A menor distancia a las vías de comunicación, mayor accesibilidad e intervención humana y, por tanto, mayor vulnerabilidad territorial.	SIGTIERRAS	1 = Vulnerabilidad muy baja 2 = Vulnerabilidad baja 3 = Vulnerabilidad media 4 = Vulnerabilidad alta 5 = Vulnerabilidad muy alta	20 % (0,20)
V4	Sensibilidad de la cobertura vegetal	A mayor transformación, fragmentación y sensibilidad ecológica de la cobertura vegetal, mayor vulnerabilidad frente a los efectos de los incendios forestales.	SIGTIERRAS	1 = Vulnerabilidad muy baja 2 = Vulnerabilidad baja 3 = Vulnerabilidad media 4 = Vulnerabilidad alta 5 = Vulnerabilidad muy alta	20 % (0,20)
V5	Capacidad de respuesta institucional	A menor capacidad institucional de prevención, preparación, respuesta y recuperación, mayor vulnerabilidad territorial.	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Colta	1 = Vulnerabilidad muy baja 2 = Vulnerabilidad baja 3 = Vulnerabilidad media 4 = Vulnerabilidad alta 5 = Vulnerabilidad muy alta	20 % (0,20)
Total					100% (1,00)

Para el análisis de la vulnerabilidad, se consideraron los criterios de clasificación, ponderación y estandarización espacial aplicados a las cinco variables que conformaron el modelo de vulnerabilidad territorial (tabla 5). Las variables se reclasificaron mediante una escala común de valoración comprendida entre 1 y 5, donde 1 representó el nivel de vulnerabilidad muy bajo y 5 el nivel de vulnerabilidad muy alto.

Tabla 5*Rangos de clasificación, ponderación y nivel de vulnerabilidad*

Valor	Nivel de vulnerabilidad	Distancia a vías, centros poblados y comunidades (m)	Tipo de cobertura vegetal	Capacidad de respuesta institucional
1	Muy baja	> 2.000	Cuerpos de agua y humedales	Muy alta
2	Baja	1.501–2.000	Bosque húmedo	Alta

3	Media	1.001–1.500	Plantaciones forestales	Media
4	Alta	501–1.000	Vegetación de páramo, cultivos de altura y áreas eriales	Baja
5	Muy alta	0–500	Pasto cultivado, Cultivo–Pasto–Bosque, Cultivo–Pasto y Bosque–Cultivo–Pasto	Muy baja

La vulnerabilidad territorial frente a los efectos potenciales de los incendios forestales se determinó mediante la Ecuación 3. El análisis integró factores de exposición proximidad a vías, centros poblados y comunidades, sensibilidad ecológica cobertura vegetal y capacidad de respuesta institucional.

A cada variable se le asignó una ponderación uniforme del 20 %, debido a que no se dispuso de evidencia empírica suficiente para establecer pesos diferenciados.

$$V_t = \sum_{(i=1)}^5 W_i X_i = 0,20(V_1) + 0,20(V_2) + 0,20(V_3) + 0,20(V_4) + 0,20(V_5) \text{ (Ec. 3)}$$

Donde:

(V_t): índice de vulnerabilidad territorial total.

(V_1): nivel de vulnerabilidad asociado con la proximidad a las vías de comunicación.

(V_2): nivel de vulnerabilidad asociado con la proximidad a los centros poblados.

(V_3): nivel de vulnerabilidad asociado con la proximidad a las comunidades rurales.

(V_4): sensibilidad ecológica según el tipo y el estado de conservación de la cobertura vegetal.

(V_5): vulnerabilidad institucional según la capacidad de respuesta y gestión de las entidades locales.

La cobertura vegetal se incorporó tanto en el componente de amenaza como en el de vulnerabilidad; sin embargo, su función dentro de cada índice fue diferente. En la amenaza, representó la disponibilidad, inflamabilidad y continuidad del combustible vegetal que podía favorecer la propagación del fuego.

En la vulnerabilidad, la cobertura vegetal representó el estado de conservación, la sensibilidad ecológica y la capacidad de recuperación del ecosistema frente a la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos ocasionada por los incendios forestales.

Clasificación del riesgo

El índice de riesgo se clasificó en cinco categorías ordinales, con el fin de facilitar la interpretación espacial de los resultados y establecer prioridades de intervención en las áreas con mayor riesgo de incendios forestales. La clasificación se aplicó en una escala continua de 0 a 5, en la que los valores más altos representaron un mayor nivel relativo de riesgo (Gigović et al., 2019). Las categorías obtenidas integraron la amenaza de ocurrencia del incendio y la vulnerabilidad territorial frente a sus posibles efectos, lo que permitió representar espacialmente las diferencias existentes dentro del área de estudio. Los intervalos y niveles correspondientes se presentan en la tabla 6.

Esta clasificación constituyó una herramienta de apoyo para la gestión territorial, debido a que permitió identificar zonas prioritarias para la implementación de medidas de prevención, monitoreo y respuesta institucional (Parra-Lara et al., 2025; Perea & García, 2024). También facilitó la planificación

del uso del suelo y la definición de acciones de restauración ecológica en las áreas afectadas o con mayor susceptibilidad al fuego (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023a; Plaza et al., 2022).

Tabla 6

Índice de riesgo de incendios forestales

Rango	Categoría	Interpretación
$0,0 \leq R < 1,0$	Muy bajo	Áreas con un nivel relativo mínimo de riesgo de incendios forestales. No requieren intervención inmediata, pero deben mantenerse acciones de monitoreo preventivo y conservación de las condiciones existentes.
$1,0 \leq R < 2,0$	Bajo	Áreas con condiciones limitadas para la ocurrencia y propagación del fuego. Requieren medidas preventivas, educación ambiental y seguimiento periódico para evitar el incremento del riesgo.
$2,0 \leq R < 3,0$	Medio	Zonas donde confluyen niveles moderados de amenaza y vulnerabilidad. Requieren acciones de manejo, vigilancia comunitaria, control de fuentes de ignición y monitoreo de las condiciones ambientales.
$3,0 \leq R < 4,0$	Alto	Áreas con un elevado nivel relativo de riesgo debido a la interacción de factores climáticos, topográficos, biofísicos y antrópicos. Requieren intervenciones prioritarias de prevención, preparación, monitoreo y fortalecimiento de la capacidad de respuesta.
$4,0 \leq R \leq 5,0$	Muy alto	Áreas críticas donde coinciden niveles elevados de amenaza y vulnerabilidad. La ocurrencia de incendios podría ocasionar pérdidas significativas de biodiversidad, carbono orgánico, cobertura vegetal y capacidad de regulación hídrica. Estas zonas requieren acciones inmediatas de prevención, alerta temprana, respuesta y restauración ecológica.

Validación del modelo

La confiabilidad del modelo de riesgo se evaluó mediante un procedimiento de validación espacial sustentado en el inventario histórico de incendios forestales registrados en el área de estudio. Para ello, los puntos correspondientes a los eventos ocurridos durante el período analizado se superpusieron al mapa final de riesgo generado mediante la evaluación multicriterio (Cisneros-Vaca et al., 2023; Gigović et al., 2019).

Posteriormente, se calculó el porcentaje de incendios localizados en cada categoría de riesgo, con el propósito de determinar la capacidad del modelo para identificar las zonas con mayor probabilidad relativa de ocurrencia. Una mayor concentración de eventos en las categorías alta y muy alta se interpretó como evidencia de una adecuada correspondencia espacial entre el modelo y los registros históricos.

El procedimiento empleado para la validación se describe en la sección siguiente, mientras que los resultados se presentan y analizan en el apartado correspondiente a la validación del modelo. La exactitud del modelo se estimó mediante la expresión presentada en la Ecuación 4:

$$VA = \frac{N_{AR}}{N_T} \times 100 \text{ (Ec. 4)}$$

Donde:

VA : Porcentaje de validación del modelo.

NAR: Número de incendios identificados en la zona de estudio.

NT: Número total de incendios registrados.

Diseño de estrategias de gestión de riesgo

Las estrategias de prevención y manejo se formularon con base en las categorías identificadas en el mapa de riesgo. Para cada nivel, se definieron medidas de intervención diferenciadas según la magnitud de la amenaza, la vulnerabilidad territorial y la recurrencia histórica de los incendios forestales (Perea & García, 2024; M. Ramos et al., 2018). El diseño de las estrategias se sustentó en los principios de la gestión integral del riesgo y el manejo del fuego. Para ello, se priorizaron acciones de prevención, preparación, monitoreo, respuesta institucional y restauración ecológica (Parra-Lara et al., 2025; Plaza et al., 2022).

También se consideraron los lineamientos establecidos por el Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, el Cuerpo de Bomberos y el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta (GAD Colta, 2023; MAATE, 2023a, 2023b). Estas directrices se complementaron con medidas de sensibilización comunitaria, fortalecimiento de las capacidades institucionales y coordinación entre los actores responsables de la prevención, preparación y control de los incendios forestales (Perea & García, 2024; M. Ramos et al., 2018). Las estrategias definidas para cada categoría de riesgo se presentan en la tabla 7.

Tabla 7

Estrategias de gestión propuestas de acuerdo con el nivel del riesgo de incendios forestales

Nivel de riesgo	Objetivo de gestión	Estrategias propuestas
Bajo	Mantener las condiciones actuales y evitar el incremento del riesgo.	• Implementar programas permanentes de educación ambiental dirigidos a las comunidades. • Realizar vigilancia preventiva y monitoreo periódico. • Intensificar las acciones de control y seguimiento durante la época seca. • Promover prácticas responsables para prevenir fuentes de ignición.
Medio	Reducir las condiciones que favorecen la ocurrencia y propagación de incendios forestales.	• Desarrollar jornadas comunitarias de sensibilización y prevención. • Identificar y manejar las zonas con acumulación de vegetación seca y combustible fino. • Implementar protocolos de vigilancia comunitaria. • Regular y supervisar las quemas agropecuarias controladas. • Fortalecer el monitoreo durante los períodos de mayor sequedad.
Alto	Disminuir la vulnerabilidad territorial y fortalecer la capacidad de preparación y respuesta.	• Capacitar a las comunidades sobre procedimientos de actuación frente a incendios forestales. • Conformar y fortalecer brigadas comunitarias de prevención y respuesta. • Mantener vigilancia permanente durante la época seca. • Establecer y mantener cortafuegos, previa evaluación técnica y ambiental. • Manejar estratégicamente la vegetación seca en zonas prioritarias. • Definir rutas de evacuación y puntos seguros. • Capacitar en primeros auxilios y respuesta inicial ante incendios.

Muy alto	Minimizar las pérdidas ecológicas y sociales, y fortalecer la respuesta integral ante emergencias.	• Implementar sistemas de alerta temprana. • Monitorear focos de calor y variables meteorológicas. • Elaborar y actualizar planes de contingencia y emergencia. • Realizar simulacros comunitarios de respuesta ante incendios forestales. • Establecer protocolos y mecanismos de comunicación interinstitucional. • Ejecutar acciones de restauración ecológica posincendio. • Monitorear la recuperación de la vegetación nativa, el suelo y los servicios ecosistémicos. • Evaluar periódicamente la capacidad institucional y comunitaria de respuesta.
----------	--	--

Los incendios forestales se consideraron una amenaza constante para los ecosistemas naturales, así como para la seguridad y el bienestar de las comunidades. Por esta razón, se planteó reducir su ocurrencia y sus impactos mediante estrategias de prevención, educación ambiental y sensibilización comunitaria. Estas acciones se orientaron a fortalecer la conciencia ambiental, promover prácticas responsables y disminuir las conductas negligentes que podían desencadenar incendios forestales (Perea & García, 2024).

3. Resultados

Distribución espacial de los factores condicionantes de la amenaza de incendios forestales

La estimación espacial de la amenaza integró cinco variables climáticas, biofísicas y antrópicas: precipitación, temperatura, pendiente, cobertura vegetal y focos de calor. Estos factores permitieron representar las condiciones territoriales asociadas con la ignición y la propagación del fuego en el ecosistema altoandino (Bowman et al., 2020; Gigović et al., 2019).

Cada variable se procesó y reclasificó mediante el análisis multicriterio, lo que permitió integrar sus valores en una escala común. Como resultado, se obtuvieron superficies espaciales diferenciadas para cada factor y se identificaron distintos niveles relativos de amenaza.

La integración de las variables permitió delimitar las áreas donde coincidieron condiciones climáticas, topográficas y de cobertura vegetal favorables para la ocurrencia y propagación de incendios forestales. Este procedimiento facilitó la identificación de los sectores con amenaza muy baja, baja, media, alta y muy alta (Gigović et al., 2019).

Los resultados obtenidos constituyeron la base para analizar la distribución espacial y temporal de la amenaza en el páramo de Navag. También permitieron determinar los factores que presentaron mayor correspondencia con las zonas clasificadas en los niveles superiores de amenaza.

Precipitación

El análisis de la distribución espacial de la precipitación evidenció variaciones entre las seis estaciones meteorológicas consideradas. Durante el período de estudio, la estación M0404 Cañi registró el valor más alto, correspondiente a 157 mm.

Los valores más bajos se observaron en la estación M01036 ESPOCH, con 45,27 mm en 2016 y 46,45 mm en 2018. En 2017, las seis estaciones registraron un incremento de la precipitación, por lo que este año presentó condiciones comparativamente más húmedas (figura 2).

La variabilidad registrada entre las estaciones mostró una distribución espacial heterogénea de la precipitación en el área de influencia del páramo de Navag. Estas diferencias pueden relacionarse con la altitud, el relieve y la circulación atmosférica regional característica de la cordillera de los Andes (Pizarro et al., 2003; R. Ramos et al., 2008).

Las diferencias observadas entre 2016, 2017 y 2018 evidenciaron una variabilidad climática interanual, con mayores niveles de precipitación durante 2017. Esta fluctuación modificó la disponibilidad relativa de humedad en la vegetación y el suelo (Jones et al., 2022).

Los menores valores de precipitación registrados durante 2016 y 2018 se asociaron con condiciones más favorables para la desecación del combustible vegetal. La reducción de su contenido de humedad puede incrementar la inflamabilidad y facilitar la propagación del fuego (Bowman et al., 2020; Sarango-Cobos et al., 2019).

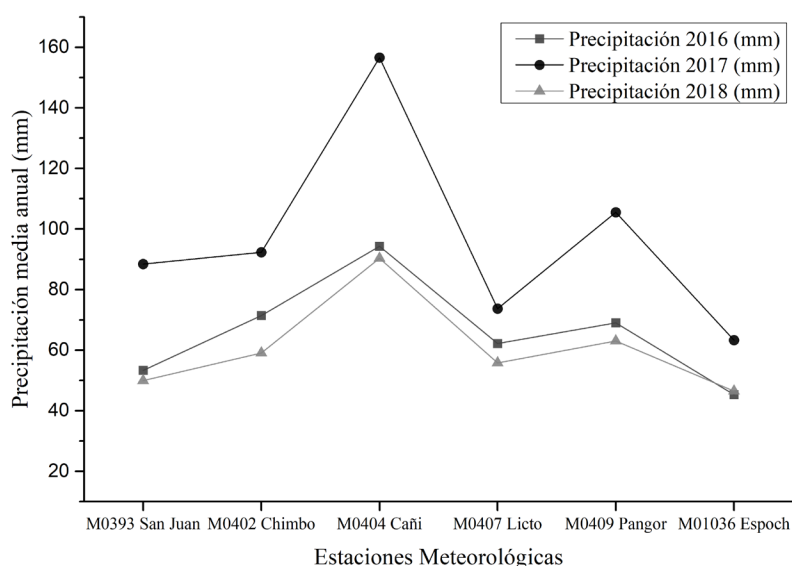
En contraste, el aumento de la precipitación observado en 2017 representó una mayor disponibilidad hídrica y una menor predisposición relativa del combustible vegetal a la combustión. Por esta razón, la precipitación constituyó una variable relevante en la estimación espacial de la amenaza.

Los resultados se interpretaron considerando la disponibilidad, continuidad y distribución espacial limitada de los registros meteorológicos. Estas condiciones pudieron afectar la precisión de la interpolación, especialmente en las zonas de alta montaña con menor cobertura de estaciones.

En consecuencia, la superficie generada representó una aproximación espacial a las condiciones de precipitación del área de estudio, elaborada a partir de los registros disponibles en las estaciones más próximas al páramo de Navag (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2025).

Figura 2

Distribución espacial de la precipitación media anual durante el periodo 2016-2018



La figura 3 muestra la distribución espacial de la precipitación para cada uno de los años comprendidos en el periodo 2016–2018 en el páramo de Navag. Las superficies se obtuvieron mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), a partir de los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2025).

En 2016, el sector nororiental presentó valores de precipitación comprendidos entre 40 y 60 mm, clasificados en la categoría de amenaza media. En contraste, los sectores sur y occidental registraron valores de entre 60 y 80 mm, asociados con una amenaza baja.

Durante 2017 se evidenció un incremento generalizado de la precipitación, con valores superiores a 80 mm en gran parte del área analizada. Estas condiciones determinaron el predominio de la categoría de amenaza muy baja, debido a la mayor disponibilidad relativa de humedad.

En 2018 se registraron nuevamente valores de precipitación de entre 40 y 60 mm en las zonas norte, central y oriental del páramo. En estos sectores predominó la categoría de amenaza media, mientras que la amenaza baja se concentró en el extremo occidental, donde se observaron valores de entre 60 y 80 mm.

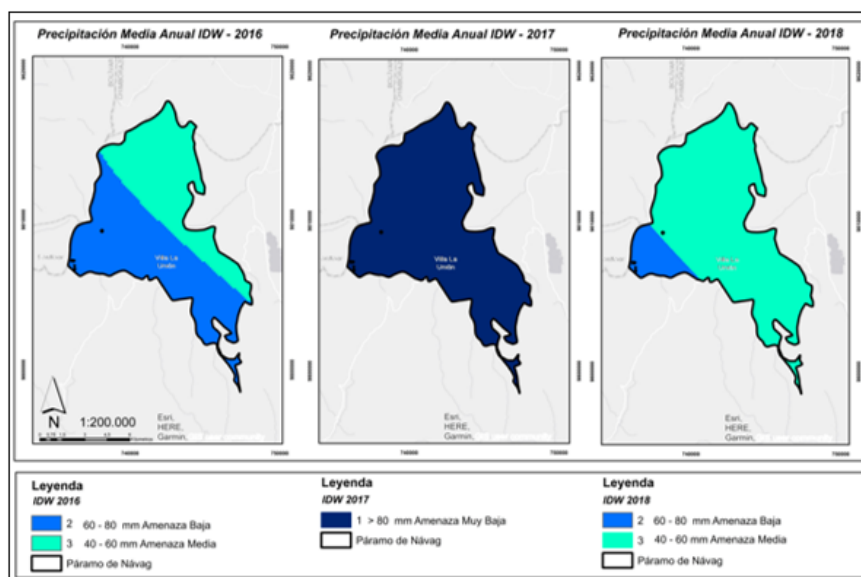
La distribución espacial obtenida evidenció diferencias tanto entre los sectores del páramo como entre los años analizados. Estas variaciones pueden relacionarse con la influencia de la altitud, el relieve y la circulación atmosférica regional en la distribución de las lluvias (Pizarro et al., 2003; R. Ramos et al., 2008).

Los sectores con menores valores de precipitación presentaron una mayor amenaza relativa asociada con esta variable, debido a que una menor disponibilidad de humedad puede favorecer la desecación del suelo y del combustible vegetal (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022).

Sin embargo, la precipitación no determinó por sí sola la ocurrencia de incendios forestales, ya que su efecto dependió de la interacción con la temperatura, la pendiente, la cobertura vegetal y los focos de calor. Por esta razón, la superficie interpolada de precipitación se integró con las demás variables del análisis multicriterio para estimar el índice espacial de amenaza (Gigović et al., 2019).

Figura 3

Interpolación espacial de la precipitación media anual (IDW) durante el periodo 2016-2018



Temperatura

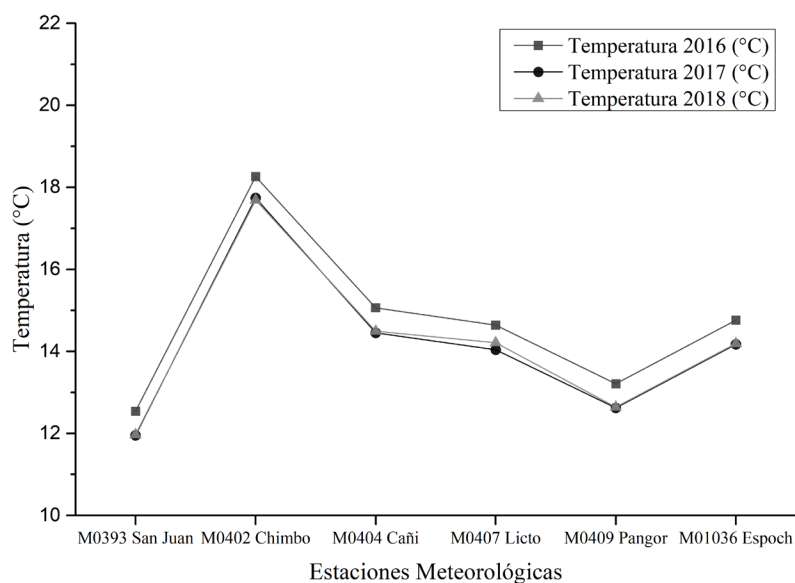
El análisis espacial de la temperatura identificó sectores con valores superiores a 14 °C, localizados principalmente en las zonas sur y oriental del área de estudio. Estos sectores se asociaron con la categoría de amenaza muy alta correspondiente al subfactor temperatura. En las zonas central y norte

del páramo se registraron temperaturas comprendidas entre 12 y 14 °C, las cuales se clasificaron en la categoría de amenaza alta frente a incendios forestales.

Durante 2017 y 2018, el intervalo térmico de 12 a 14 °C predominó en la totalidad del páramo de Navag. Este patrón evidenció una baja variación espacial e interanual de la temperatura durante los años analizados (figura 4). La distribución observada mostró que los sectores con temperaturas más elevadas presentaron una mayor amenaza relativa asociada con esta variable. No obstante, su influencia en el índice final dependió de la interacción con la precipitación, la pendiente, la cobertura vegetal y los focos de calor.

Figura 4

Distribución espacial de la temperatura media anual durante el periodo 2016-2018



La figura 5 muestra la distribución espacial de la temperatura media anual en el área de estudio. Las superficies térmicas se generaron mediante el método de interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), a partir de los registros de las estaciones meteorológicas próximas al páramo.

Los resultados evidenciaron el predominio de temperaturas comprendidas entre 12 y 14 °C, lo que indicó una baja variabilidad espacial e interanual durante el período analizado. Este comportamiento fue más estable que el observado para la precipitación.

Desde la perspectiva de la amenaza, la temperatura se consideró un factor condicionante debido a su influencia sobre la evapotranspiración y el contenido de humedad del combustible vegetal. Los sectores relativamente más cálidos pudieron favorecer una mayor desecación de la vegetación superficial durante los períodos secos (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022).

Aunque las diferencias térmicas fueron moderadas, las zonas con temperaturas superiores presentaron una mayor amenaza relativa asociada con este subfactor. Por esta razón, la temperatura se incorporó como variable de entrada en el modelo multicriterio utilizado para estimar el índice de amenaza.

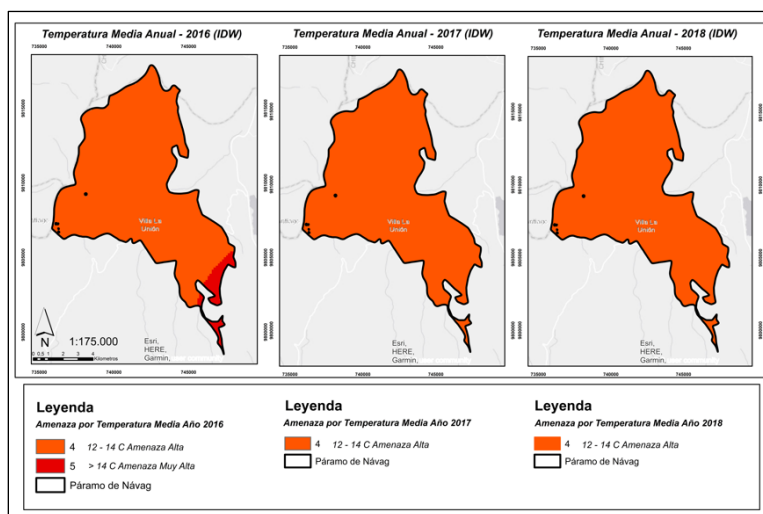
Las áreas con temperaturas relativamente más elevadas coincidieron parcialmente con sectores que posteriormente fueron clasificados en categorías superiores de amenaza. Esta correspondencia sugirió una relación espacial, pero no permitió atribuir a la temperatura un efecto causal independiente.

Los páramos se caracterizan por presentar temperaturas relativamente bajas en comparación con otros ecosistemas. Sin embargo, no son las temperaturas bajas las que reducen la humedad de la vegetación, sino el incremento térmico combinado con períodos de déficit hídrico, condición que puede acelerar la desecación del combustible y favorecer su combustión.

En consecuencia, la temperatura actuó como un factor modulador de la amenaza, cuya influencia aumentó cuando interactuó con la escasez de precipitación, la disponibilidad de combustible vegetal y otros condicionantes ambientales.

Figura 5

Distribución espacial de la temperatura media anual (IDW 2016-2017-2018) en el páramo de Navag



Pendiente

El análisis de la pendiente se realizó con información cartográfica obtenida de la plataforma SIGTIERRAS, correspondiente al año 2022. A partir del modelo digital de elevación, se caracterizó la configuración topográfica del área de estudio. Los resultados evidenciaron un relieve predominantemente inclinado, característico de la región andina. Las pendientes más elevadas se localizaron principalmente en los sectores occidental y suroccidental del páramo.

La figura 6 muestra el predominio de pendientes comprendidas entre 5° y 10°, clasificadas en la categoría de amenaza baja, y entre 10° y 15°, asociadas con una amenaza media. Estas categorías se distribuyeron principalmente en las zonas central, norte y oriental del área de estudio. Las superficies con pendientes inferiores a 5°, correspondientes a la categoría de amenaza muy baja, se presentaron de manera dispersa y fragmentada en diferentes sectores del páramo.

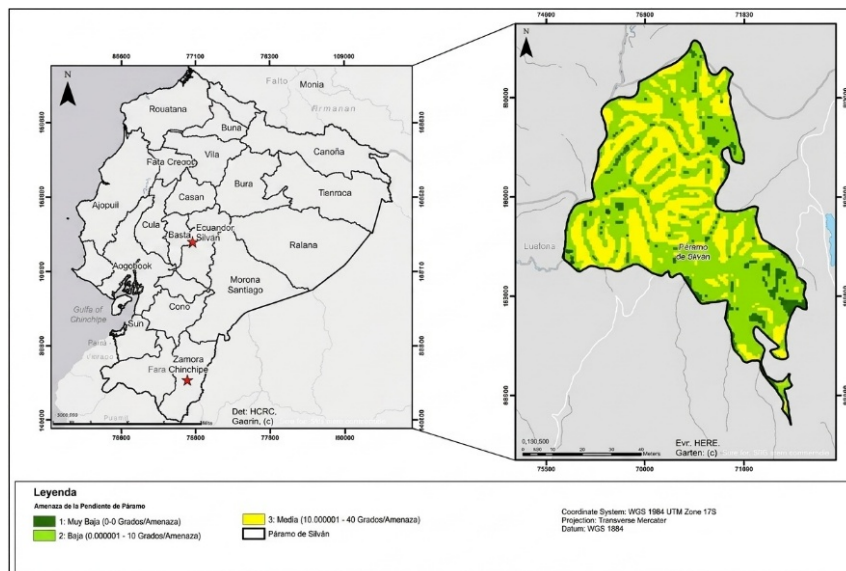
En conjunto, la distribución espacial mostró que el páramo de Navag presentó una configuración topográfica moderadamente inclinada, aunque con sectores de mayor pendiente en sus flancos occidental y suroccidental. Desde la perspectiva de la dinámica del fuego, la pendiente puede favorecer una propagación más rápida hacia las zonas superiores del terreno, debido al precalentamiento de la vegetación y a la transferencia ascendente de calor.

Por tanto, las áreas con pendientes más pronunciadas presentaron una mayor amenaza relativa asociada con este subfactor, especialmente cuando coincidieron con coberturas vegetales continuas, baja humedad y condiciones meteorológicas favorables para la propagación del fuego (Keeley & Syphard, 2021). No obstante, la pendiente no determinó por sí sola la ocurrencia de incendios, sino que

su influencia dependió de la interacción con la cobertura vegetal, la temperatura, la precipitación y las fuentes de ignición.

Figura 6

Análisis espacial de la pendiente del terreno (Slope) en el páramo de Navag



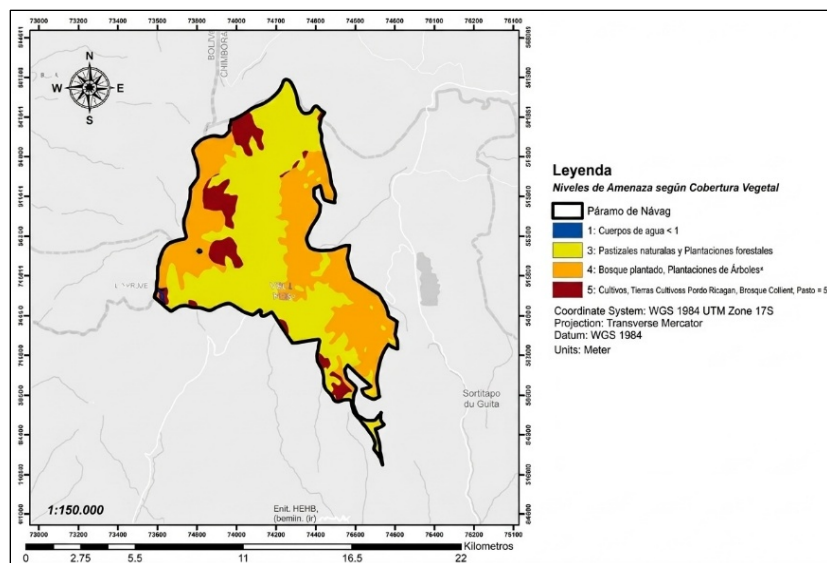
Cobertura vegetal

La cobertura vegetal constituyó un factor relevante en la configuración espacial de la amenaza. El análisis evidenció una marcada diferenciación entre las coberturas naturales de páramo y las áreas transformadas por actividades agropecuarias. La cartografía empleada correspondió al año 2022 y se utilizó como una aproximación de las condiciones de cobertura para los tres años analizados. Esta decisión respondió a la ausencia de una serie multitemporal homogénea para el área de estudio.

La cobertura vegetal no se consideró completamente invariable, sino relativamente estable a corto plazo. Por ello, su utilización para el período 2016–2018 constituyó una limitación metodológica que debía considerarse al interpretar los resultados. La información cartográfica se procesó y reclasificó de acuerdo con los criterios de valoración establecidos en la metodología. Este procedimiento permitió determinar el nivel relativo de amenaza asociado con la disponibilidad, continuidad e inflamabilidad del combustible vegetal.

Las categorías Bosque–Cultivo–Pasto, Cultivo–Pasto y Cultivo–Pasto–Bosque presentaron los niveles más elevados de amenaza asociados con la cobertura vegetal. Estas unidades se distribuyeron principalmente en los flancos occidental, oriental y sur del área de estudio (figura 7). Este patrón espacial evidenció una correspondencia entre las coberturas transformadas y las categorías superiores de amenaza. Sin embargo, los resultados cartográficos no permitieron establecer por sí solos una relación causal directa entre el cambio de uso del suelo y la ocurrencia de incendios.

La transformación de la vegetación natural puede modificar la composición, distribución y continuidad del combustible vegetal, además de incrementar la interacción humana con el ecosistema. Estas condiciones pueden favorecer la ignición y propagación del fuego asociadas con las actividades agropecuarias (Bustamante et al., 2011; Ríos, 2023). En contraste, los cuerpos de agua y las áreas de humedal se clasificaron en los niveles mínimos de amenaza asociados con este subfactor, debido a su mayor disponibilidad de humedad y a su baja predisposición relativa a la combustión.

Figura 7*Cobertura vegetal del páramo de Navag***Focos de calor**

Para el análisis de los focos de calor, los registros se obtuvieron de la plataforma Fire Information for Resource Management System (FIRMS) y se procesaron mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS. El conteo de los eventos se organizó por año para el período 2016–2018, lo que permitió incorporar la variación temporal de la actividad térmica en el modelo de amenaza. Durante 2016, se identificó la mayor concentración de focos de calor en el área de estudio. Estos registros se asociaron con las categorías de amenaza media y alta. En contraste, durante 2017 y 2018 no se detectaron focos de calor dentro de los límites del páramo de Navag (figura 8).

Los focos de calor se utilizaron como indicadores espaciales de actividad térmica potencialmente relacionada con incendios o quemas. Sin embargo, se analizaron junto con las demás variables ambientales y antrópicas. Esta consideración respondió a que los focos térmicos detectados mediante sensores remotos no representaron necesariamente incendios forestales confirmados (Cisneros-Vaca et al., 2023; Ríos, 2023).

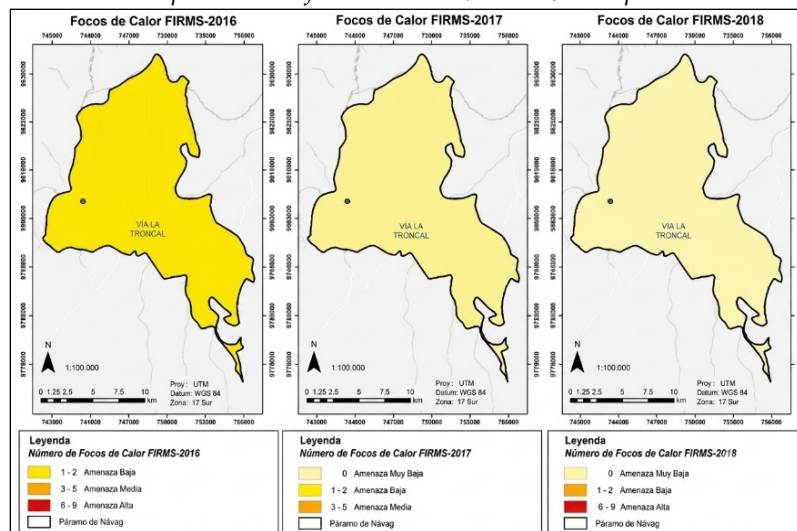
La ausencia de registros en 2017 y 2018 indicó una menor actividad térmica detectada durante esos años, pero no implicó la eliminación de la amenaza de incendios forestales. Por el contrario, este comportamiento evidenció una variabilidad interanual, condicionada por las condiciones meteorológicas, la disponibilidad de combustible vegetal y las actividades humanas (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022).

Con base en el número y la concentración espacial de los focos identificados dentro del páramo de Navag, la variable se reclasificó en cinco categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Este procedimiento permitió integrar los registros históricos en el análisis multicriterio e identificar las áreas con mayor concentración relativa de actividad térmica (Gigović et al., 2019).

La superficie resultante no representó por sí sola el riesgo de incendios forestales, sino uno de los subfactores empleados para estimar el componente de amenaza. Su integración con la precipitación, la temperatura, la pendiente y la cobertura vegetal permitió representar de manera conjunta las condiciones territoriales asociadas con la ocurrencia y propagación del fuego.

Figura 8

Distribución espacial de los focos de Calor (FIRMS) en el páramo de Navag



Distribución espacial del índice de amenaza de incendios forestales

La integración de los cinco factores permitió obtener el índice espacial de amenaza correspondiente a 2016, 2017 y 2018. El modelo evidenció el predominio de las categorías media y alta, con variaciones en su extensión y distribución entre los años analizados.

Las áreas clasificadas con amenaza alta se relacionaron principalmente con coberturas transformadas por actividades agropecuarias y con una mayor disponibilidad de combustible vegetal. Estas condiciones pueden favorecer la propagación del fuego cuando coinciden con periodos secos y fuentes de ignición (Bowman et al., 2020; Ríos, 2023).

En 2016 se registró la mayor extensión de superficies clasificadas con amenaza alta, localizadas principalmente en los sectores oriental, noroccidental y sur del páramo. Este patrón espacial coincidió con la distribución de los focos de calor detectados durante ese año. En estas zonas también confluyeron menores valores de precipitación, coberturas vegetales susceptibles y áreas transformadas por actividades agropecuarias. La interacción de estas condiciones pudo favorecer la ignición y la propagación del fuego (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022).

En 2017, la extensión de las categorías superiores de amenaza disminuyó, en correspondencia con condiciones comparativamente más húmedas y con la ausencia de focos de calor detectados. Este año presentó el escenario de menor amenaza relativa dentro del período analizado. En 2018 se observó un nuevo incremento de la amenaza en sectores específicos del sur y occidente del área de estudio (figura 9). Sin embargo, su distribución fue más localizada que la registrada en 2016.

El análisis integrado evidenció una correspondencia espacial entre las áreas sometidas a intervención agropecuaria y las categorías superiores de amenaza. Este patrón fue más evidente en las zonas donde la cobertura natural del páramo había sido sustituida o modificada (Bustamante et al., 2011; Parra-Lara et al., 2025).

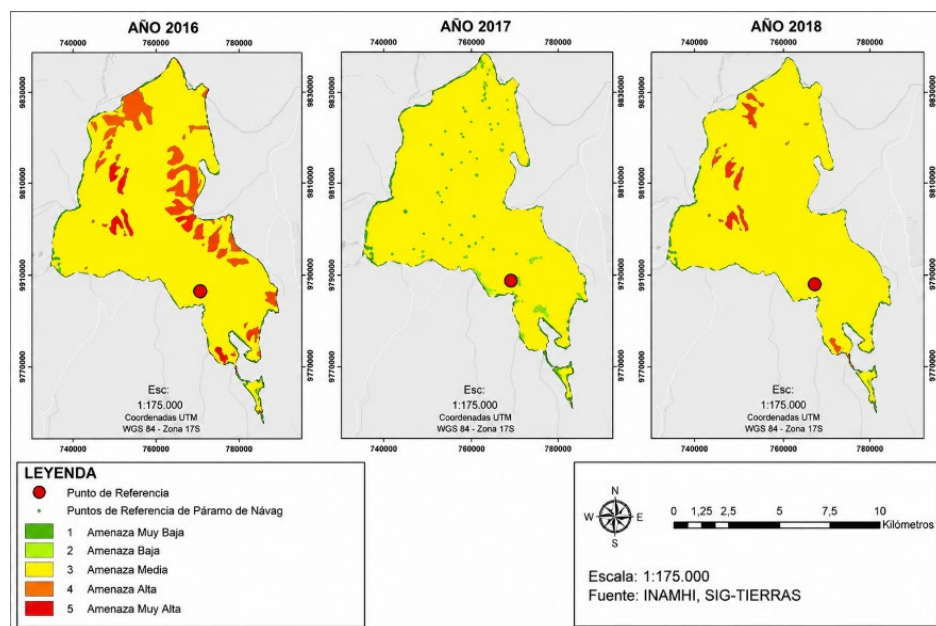
La transformación de la cobertura vegetal pudo modificar la cantidad, la composición y la continuidad espacial del combustible disponible. También incrementó la interacción humana con el ecosistema, condición que puede favorecer la presencia de fuentes de ignición. No obstante, los resultados no permitieron atribuir la amenaza exclusivamente al cambio de uso del suelo, debido a

que su configuración dependió también de la precipitación, la temperatura, la pendiente y la actividad térmica registrada.

En conjunto, los resultados mostraron que el cambio de uso del suelo constituyó uno de los factores asociados con la distribución espacial de la amenaza, aunque no representó su única causa. Esta evidencia proporcionó una base territorial para orientar medidas preventivas y priorizar intervenciones en las áreas más críticas (Perea & García, 2024; M. Ramos et al., 2018).

Figura 9

Amenaza de incendios forestales en el páramo de Navag



Evaluación de la vulnerabilidad del ecosistema páramo frente a incendios forestales

La vulnerabilidad del páramo de Navag se estimó mediante la integración de componentes ecológicos, sociales, funcionales e institucionales. Este análisis permitió identificar los sectores en los que un incendio forestal podía ocasionar mayores alteraciones en la estructura, los servicios ecosistémicos y la capacidad de recuperación del territorio.

El análisis cartográfico evidenció una distribución espacial heterogénea, con predominio de las categorías media y alta. Los niveles más elevados se concentraron en los flancos occidental, suroccidental y oriental del área de estudio (figura 10).

Esta distribución mostró un patrón multidimensional asociado con la coexistencia de coberturas naturales, áreas de transición y espacios sometidos a presión antrópica. La transformación y fragmentación del páramo pudieron incrementar su sensibilidad frente al fuego y reducir su capacidad de recuperación (Bustamante et al., 2011; Sarango-Cobos et al., 2019; Zhiminaicela et al., 2021).

En la dimensión social, los asentamientos humanos localizados en los sectores oriental y central, junto con la red vial, configuraron áreas de mayor exposición e interacción humana con el ecosistema. Estas condiciones pudieron favorecer la presencia de fuentes de ignición y aumentar la exposición de los componentes ecológicos y sociales (Parra-Lara et al., 2025; Ríos, 2023).

En el componente biótico y funcional, la transformación del páramo en mosaicos agropecuarios cultivos, pastos y plantaciones forestales se concentró principalmente en los sectores occidental y

meridional. Estas modificaciones alteraron la composición y continuidad de la cobertura vegetal, así como la distribución del combustible fino.

Las áreas intervenidas presentaron una mayor vulnerabilidad ecológica y una menor capacidad relativa de recuperación, especialmente cuando coincidieron con condiciones climáticas secas y actividades humanas recurrentes (Bowman et al., 2020; Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023; Sarango-Cobos et al., 2019).

El componente institucional se clasificó en un nivel intermedio de vulnerabilidad, debido a la limitada disponibilidad de información pública sobre capacidades operativas, recursos, protocolos y mecanismos específicos de preparación y respuesta ante incendios forestales.

También se identificó una presencia limitada de medidas explícitas de contingencia, mitigación y restauración posincendio en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Colta (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD Colta], 2023).

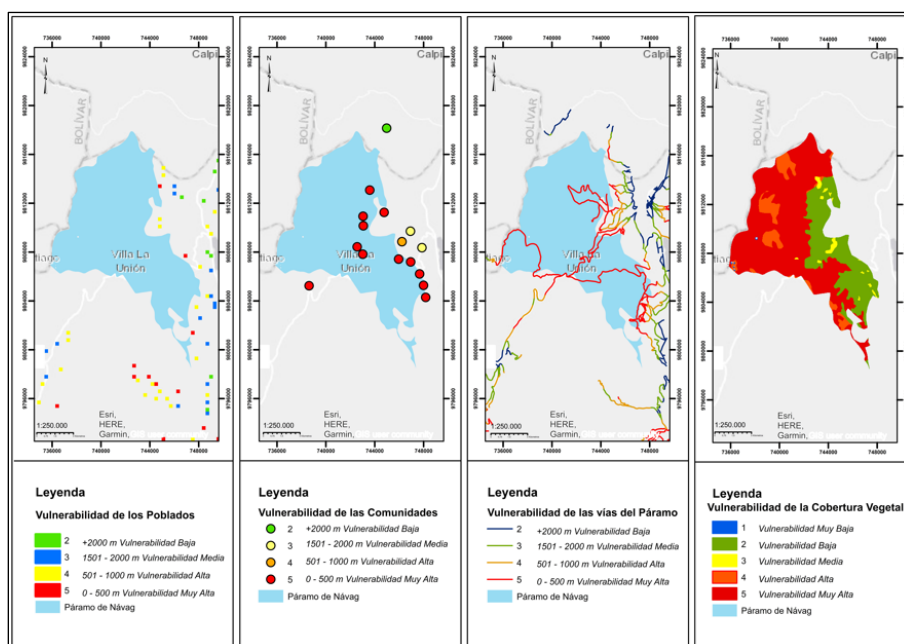
No obstante, la ausencia de información documental no se interpretó como evidencia de inexistencia de capacidad institucional, sino como una limitación para valorar integralmente este componente. Por tanto, los resultados requirieron complementarse con información directa de las instituciones responsables de la prevención y respuesta.

En conjunto, los resultados evidenciaron que la vulnerabilidad territorial dependió de la interacción entre la exposición de las comunidades, la transformación de la cobertura vegetal, la fragmentación del paisaje y las limitaciones identificadas en la planificación institucional (Parra-Lara et al., 2025; United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2022).

La convergencia espacial de estos factores permitió delimitar áreas prioritarias para fortalecer la prevención, la coordinación interinstitucional, la restauración ecológica y el manejo sostenible del territorio (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023a; Perea & García, 2024).

Figura 10

Distribución espacial y vulnerabilidad del ecosistema páramo frente a incendios forestales



Cálculo de la vulnerabilidad

La figura 11 muestra la distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad frente a incendios forestales en el área de estudio. Las categorías alta y muy alta se concentraron principalmente en los flancos occidental, suroccidental y oriental del páramo de Navag. Este patrón presentó correspondencia espacial con la proximidad a la infraestructura vial, los asentamientos humanos y los mosaicos agropecuarios. Estos factores incrementaron la exposición del territorio a las actividades antrópicas y a posibles fuentes de ignición (Parra-Lara et al., 2025; Ríos, 2023).

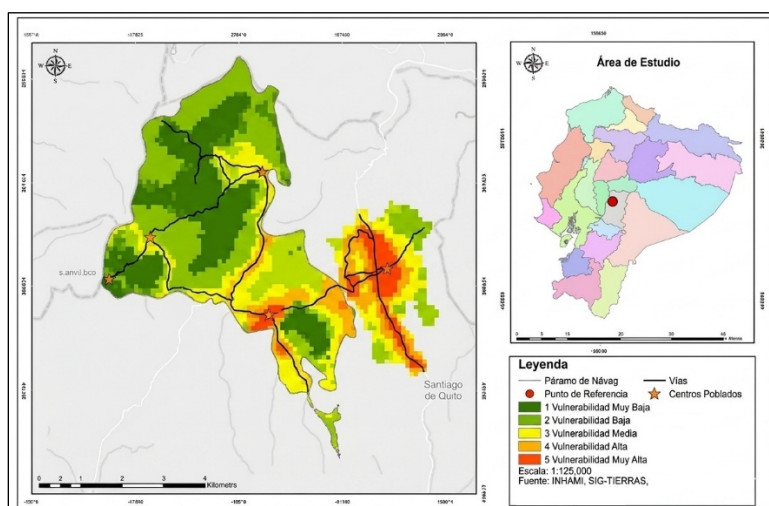
Las áreas próximas a las carreteras mostraron una mayor accesibilidad e interacción humana con el ecosistema, por lo que se clasificaron como zonas de mayor exposición. Sin embargo, las vías no se interpretaron como causas directas de los incendios, sino como factores que facilitaron el acceso y la intervención antrópica. De manera similar, la proximidad a los asentamientos y las zonas de producción agropecuaria coincidió con una mayor transformación y fragmentación del pajonal nativo. Este patrón se relacionó principalmente con la expansión de cultivos, pastos y plantaciones forestales (Bustamante et al., 2011; Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD Colta], 2023).

Estas modificaciones alteraron la composición, continuidad y distribución de la cobertura vegetal, lo que incrementó la sensibilidad ecológica y redujo la capacidad relativa de recuperación del páramo después del fuego (Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023; Sarango-Cobos et al., 2019). En contraste, las categorías de menor vulnerabilidad clases 1 y 2 se distribuyeron de manera fragmentada en el sector central y en algunas áreas aisladas del norte. Estas zonas presentaron una menor densidad vial y una intervención humana más limitada.

Los sectores de menor vulnerabilidad conservaron coberturas más continuas de vegetación nativa y áreas hidromórficas con mayor disponibilidad de humedad. Estas condiciones se asociaron con una menor sensibilidad frente al fuego y una mayor capacidad relativa de recuperación ecológica. No obstante, la presencia de vegetación nativa y zonas húmedas no eliminó por completo la vulnerabilidad territorial, debido a que esta también dependió de la intensidad del incendio, las condiciones meteorológicas, la conectividad del combustible y la capacidad institucional de respuesta (Bowman et al., 2020; Jones et al., 2022).

Figura 11

Análisis espacial de la vulnerabilidad frente a incendios forestales en el páramo de Navag



Distribución espacial del índice de riesgo de incendios forestales

La figura 12 muestra la evolución espaciotemporal del riesgo de incendios forestales en el páramo de Navag durante el período 2016–2018. El análisis se sustentó en la combinación lineal ponderada de los índices de amenaza y vulnerabilidad. Los resultados evidenciaron variaciones interanuales en la extensión y distribución espacial de las categorías de riesgo. Los niveles alto y muy alto se concentraron principalmente en los sectores occidental, suroccidental y suroriental del área de estudio.

En contraste, las áreas clasificadas con riesgo bajo se localizaron principalmente en la zona central del páramo. Estos sectores presentaron una mayor disponibilidad de humedad, pendientes moderadas y coberturas vegetales con menor predisposición relativa a la combustión. La distribución obtenida evidenció que el riesgo respondió a la interacción espacial entre factores climáticos, topográficos, biofísicos, antrópicos y territoriales, y no al efecto aislado de una sola variable (Bowman et al., 2020; Gigović et al., 2019).

Las áreas clasificadas con riesgo alto y muy alto se identificaron como sectores prioritarios para la prevención y conservación. Esta priorización se relacionó con la importancia de los ecosistemas de páramo en la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad (Bustamante et al., 2011; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023a).

La ocurrencia de incendios en estas zonas podría ocasionar alteraciones en la composición y diversidad de la vegetación, pérdida de cobertura vegetal y reducción de la capacidad de recuperación ecológica (Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023; Sarango-Cobos et al., 2019; Zhiminaicela et al., 2021). El fuego también podría modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo, disminuir su contenido de materia orgánica y alterar los procesos de infiltración y retención de agua (Camargo-García et al., 2012).

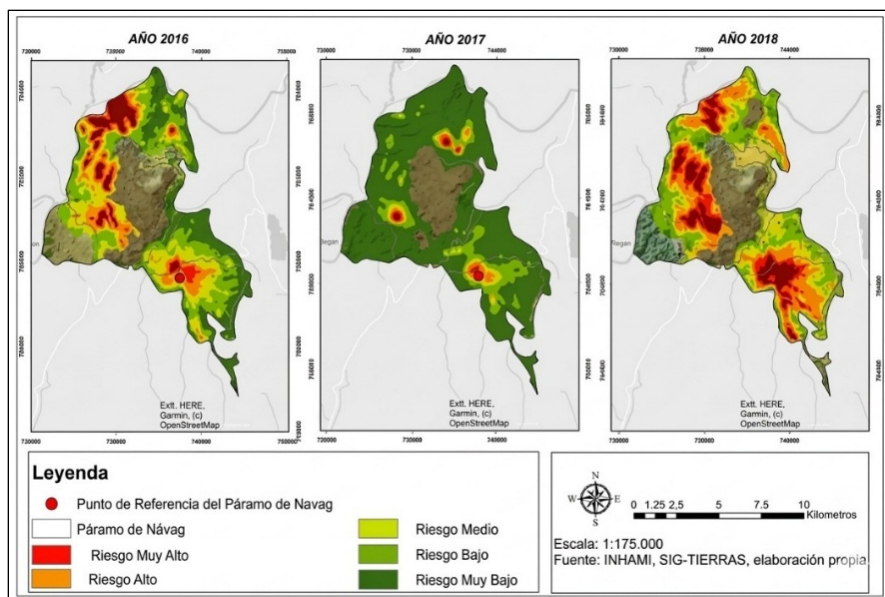
Estas alteraciones podrían comprometer la funcionalidad hidrológica del páramo y la provisión de servicios ecosistémicos para las comunidades localizadas en la parte baja de la microcuenca. Los resultados permitieron establecer una zonificación espaciotemporal del riesgo, que constituyó una herramienta de apoyo para la planificación territorial y la gestión preventiva de los incendios forestales (Parra-Lara et al., 2025; United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2022).

La identificación de los sectores prioritarios permitió orientar la asignación de recursos destinados al monitoreo, la vigilancia y el fortalecimiento de la capacidad institucional de respuesta. También facilitó la definición de acciones de prevención, manejo del combustible vegetal y restauración ecológica en las zonas clasificadas con mayor riesgo (Perea & García, 2024; Plaza et al., 2022).

En consecuencia, la zonificación obtenida proporcionó una base técnica para priorizar intervenciones destinadas a reducir la exposición y la vulnerabilidad territorial, así como para fortalecer la conservación y el uso sostenible del páramo de Navag.

Figura 12

Riesgo de incendios forestales en el páramo de Navag (2016 - 2018)



Estrategias de gestión propuestas según el nivel de riesgo

La zonificación del riesgo permitió formular estrategias de gestión diferenciadas orientadas a reducir la ocurrencia de incendios forestales y minimizar sus efectos sobre el ecosistema de páramo (tabla 8). Estas estrategias se sustentaron en los principios del manejo integrado del fuego y de la gestión adaptativa del riesgo, considerando las características biofísicas del territorio y las capacidades institucionales y comunitarias disponibles (Parra-Lara et al., 2025; Perea & García, 2024).

En las zonas de riesgo bajo, las acciones se orientaron al mantenimiento de las condiciones favorables mediante programas de educación ambiental, vigilancia preventiva y monitoreo periódico. Estas medidas se plantearon para evitar el incremento de actividades antrópicas capaces de generar nuevas fuentes de ignición (M. Ramos et al., 2018; Ríos, 2023).

En las áreas de riesgo medio, se priorizaron la sensibilización comunitaria, la regulación de las quemadas agropecuarias, el manejo preventivo de combustibles finos y el fortalecimiento de la vigilancia local. Estas acciones se propusieron para disminuir las condiciones asociadas con la ignición y la propagación del fuego (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2023b; Perea & García, 2024).

En las zonas de riesgo alto, las estrategias se enfocaron en fortalecer la preparación y la capacidad de respuesta mediante la conformación de brigadas comunitarias, la capacitación de actores locales y la definición de rutas de evacuación. También se consideraron el establecimiento técnico de cortafuegos y el manejo estratégico de la vegetación seca, previa evaluación ambiental y territorial.

En las áreas de riesgo muy alto, se planteó una gestión integral basada en sistemas de alerta temprana, monitoreo remoto de focos de calor, planes de contingencia, simulacros y protocolos de comunicación interinstitucional. Estas medidas se concibieron para su articulación con las entidades responsables de la prevención, el control y la respuesta ante incendios forestales (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD Colta], 2023; United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2022).

Para estas zonas también se propusieron programas de restauración ecológica posincendio orientados a recuperar la cobertura vegetal, reducir la erosión y restablecer progresivamente las funciones ecosistémicas del páramo (MAATE, 2023a; Plaza et al., 2022). En conjunto, estas medidas constituyeron una base técnica para orientar la planificación territorial, priorizar los recursos institucionales y fortalecer la coordinación con las comunidades locales. Su implementación podría contribuir a reducir la ocurrencia y los impactos de los incendios forestales, así como a conservar y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas de páramo.

Tabla 8

Estrategias de gestión propuestas según el nivel de riesgo de incendios forestales

Nivel de riesgo	Objetivo de gestión	Enfoque de intervención	Acciones prioritarias	Actores responsables	Horizonte de implementación
Bajo	Mantener las condiciones ecológicas actuales y evitar el incremento del riesgo.	Prevención y conservación.	Programas permanentes de educación ambiental. Vigilancia preventiva durante la época seca. Monitoreo periódico de variables climáticas y cobertura vegetal. Actualización anual de los mapas de riesgo. Promoción de buenas prácticas agropecuarias.	Comunidades locales y centros educativos, GAD parroquiales y cantonales, Ministerio de Ambiente y Energía.	Permanente. Intensificar durante la estación seca.
Medio	Reducir el nivel relativo de riesgo de incendios de origen antrópico.	Prevención activa y de reducción de factores de amenaza.	Campañas de sensibilización comunitaria. Identificación y manejo de combustibles finos (pajonal seco). Regulación y control de quemas controladas. Fortalecimiento de la vigilancia comunitaria. Monitoreo preventivo de condiciones meteorológicas.	Cuerpo de Bomberos, Ministerio de Ambiente y Energía, GAD municipales, líderes comunitarios y organizaciones locales.	Corto plazo (1-2 años).
Alto	Disminuir la vulnerabilidad del territorio y fortalecer la capacidad de respuesta.	Preparación y respuesta inicial.	Conformación y capacitación de brigadas comunitarias. Construcción y mantenimiento de cortafuegos. Limpieza estratégica de vegetación seca en sectores críticos. Definición de rutas de evacuación y puntos seguros. Simulacros de respuesta frente a incendios forestales.	Cuerpo de Bomberos, Servicio Nacional de Gestión de Riesgos, Ministerio de Ambiente y Energía, GAD cantonales y comunidades organizadas.	Corto y mediano plazo (1-3 años).

Muy alto	Minimizar las pérdidas ecológicas y socioambientales y fortalecer la resiliencia del ecosistema.	Gestión integral del riesgo y restauración ecológica.	Implementación de sistemas de alerta temprana.	Servicio Nacional de Gestión de Riesgos, Ministerio de Ambiente y Energía, Cuerpo de Bomberos, gobiernos locales, universidades y comunidades.	Inmediato y permanente.
			Monitoreo continuo de focos de calor mediante sensores remotos.		
			Ejecución de planes de contingencia y emergencia.		
			Protocolos de comunicación interinstitucional.		
			Restauración ecológica post incendio con especies nativas.		
			Evaluación del impacto ambiental y seguimiento de la recuperación del ecosistema.		

4. Discusión

Los hallazgos obtenidos evidenciaron que la distribución espacial de la amenaza de incendios forestales en el páramo de Navag estuvo determinada por la interacción de factores climáticos, topográficos, biofísicos y antrópicos, más que por el efecto independiente de una sola variable. Las áreas con menores niveles de precipitación y temperaturas relativamente más elevadas concentraron las categorías superiores de amenaza. Esta coincidencia espacial pudo relacionarse con una menor disponibilidad de humedad en la vegetación y con una mayor desecación del combustible fino.

Este comportamiento fue consistente con lo señalado por Bowman et al. (2020) y Jones et al. (2022), quienes sostienen que la combinación de déficit hídrico, incremento térmico y disponibilidad de combustible favorece condiciones propicias para la ignición y propagación del fuego. Jones et al. (2022) también indican que el aumento de la frecuencia y la intensidad de los eventos climáticos extremos puede prolongar las temporadas de incendios. Esta relación adquiere especial importancia en ecosistemas altoandinos sensibles a las variaciones climáticas.

La pendiente también mostró correspondencia con la distribución de la amenaza, debido a que los terrenos más inclinados coincidieron parcialmente con sectores clasificados en categorías altas. En estas condiciones, la transferencia ascendente de calor puede precalentar la vegetación situada en cotas superiores y acelerar el avance del fuego (Keeley & Syphard, 2021). No obstante, la influencia de la pendiente dependió de su interacción con la humedad, la continuidad del combustible y las fuentes de ignición. Por tanto, no constituyó un factor suficiente para explicar de manera aislada la distribución espacial de la amenaza.

La cobertura vegetal fue uno de los factores con mayor correspondencia espacial con las categorías superiores de amenaza, aunque todas las variables recibieron una ponderación uniforme dentro del modelo. Las áreas transformadas por actividades agropecuarias presentaron valores más elevados que las coberturas naturales y las zonas húmedas. Este resultado sugirió una relación entre la modificación del uso del suelo y las condiciones que favorecen el fuego. La expansión agropecuaria puede alterar la composición y continuidad del combustible vegetal, además de incrementar la presencia humana y las fuentes potenciales de ignición.

Estos hallazgos coincidieron con investigaciones realizadas en ecosistemas altoandinos de Colombia y Ecuador, donde la transformación de la cobertura, las quemas de pastizales y la expansión agrícola se asociaron con una mayor exposición al fuego (Cisneros-Vaca et al., 2023; Ocampo-Zuleta &

Parrado-Rosselli, 2023; Villacís et al., 2022). Sin embargo, la utilización de una cartografía de cobertura vegetal correspondiente a 2022 para representar el período 2016–2018 introdujo incertidumbre temporal. Por ello, la relación identificada debe interpretarse como una correspondencia espacial y no como evidencia directa de causalidad.

La evaluación de la vulnerabilidad mostró que las áreas críticas no fueron únicamente aquellas con condiciones favorables para la ocurrencia del fuego, sino también los sectores donde un incendio podía generar efectos más severos sobre la estructura y funcionalidad del ecosistema. Este resultado respaldó la necesidad de analizar el riesgo de manera integral, mediante la consideración conjunta de la amenaza, la exposición, la sensibilidad ecológica y la capacidad de respuesta y recuperación territorial.

Los incendios pueden alterar la composición vegetal, reducir la biomasa y afectar los procesos de regeneración natural (Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023; Pausas & Keeley, 2019). Estos efectos pueden prolongarse después del evento y disminuir la capacidad del páramo para recuperar su estructura original. Las alteraciones de la cobertura y del suelo también pueden comprometer la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y el almacenamiento de carbono. Estos resultados fueron coherentes con Bustamante et al. (2011) y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2023a), quienes destacan el valor estratégico de los páramos.

El estudio también mostró que la vulnerabilidad estuvo relacionada con la proximidad a asentamientos, comunidades y vías, la expansión de actividades agropecuarias y las limitaciones identificadas en la información institucional disponible. La convergencia de estos elementos incrementó la exposición y sensibilidad del territorio. Además, evidenció que la vulnerabilidad no fue exclusivamente ecológica, sino que incorporó dimensiones sociales, funcionales e institucionales.

La integración espacial de los índices de amenaza y vulnerabilidad permitió determinar la distribución del riesgo de incendios forestales. Las categorías más críticas se concentraron donde coincidieron condiciones climáticas secas, coberturas susceptibles y una mayor presión antrópica. Estos resultados respaldaron la utilidad de los sistemas de información geográfica y de la evaluación multicriterio para analizar fenómenos ambientales complejos. Estas herramientas permitieron combinar información con diferente naturaleza, unidad de medida y resolución espacial (Gigović et al., 2019).

La concentración de las categorías alta y muy alta en zonas intervenidas coincidió con estudios que identifican las actividades humanas como factores predominantes en el origen de los incendios forestales en Ecuador (Perea & García, 2024; Ríos, 2023). Por tanto, aunque las condiciones climáticas, topográficas y biofísicas determinaron la predisposición del territorio, la ocurrencia efectiva de los incendios estuvo estrechamente relacionada con las prácticas humanas y las fuentes de ignición.

Este hallazgo evidenció la necesidad de incorporar la regulación de las quemas agropecuarias, la educación ambiental y la vigilancia comunitaria en las políticas de prevención y ordenamiento territorial. El principal aporte del estudio radicó en la integración explícita de los componentes ecológico, social e institucional de la vulnerabilidad dentro del modelo de riesgo aplicado al páramo de Navag.

A diferencia de los análisis centrados exclusivamente en la susceptibilidad o amenaza, el modelo consideró las posibles consecuencias del fuego y la capacidad relativa del territorio para responder y recuperarse. Esta integración proporcionó una representación más amplia del riesgo y permitió diferenciar los sectores con condiciones favorables para el fuego de aquellos donde sus impactos potenciales podían ser más graves.

No obstante, la cobertura vegetal se incorporó tanto en el índice de amenaza como en el de vulnerabilidad. Aunque su interpretación fue diferente en cada componente, esta duplicación pudo

incrementar indirectamente su influencia en el índice final de riesgo. En la amenaza, la cobertura representó la disponibilidad y continuidad del combustible; en la vulnerabilidad, expresó la sensibilidad y el estado de conservación del ecosistema. Futuros análisis deberían evaluar este posible efecto mediante pruebas de sensibilidad y escenarios alternativos.

Las estrategias de gestión se formularon a partir de la zonificación espacial del riesgo y se diferenciaron según la magnitud de la amenaza y la vulnerabilidad. Este enfoque fue coherente con los principios del manejo integrado del fuego (Parra-Lara et al., 2025; Perea & García, 2024). La clasificación por categorías permitió establecer intervenciones proporcionales al nivel relativo de riesgo. Esta diferenciación facilitó la priorización territorial y evitó plantear medidas uniformes para sectores con condiciones ecológicas y sociales distintas.

En las áreas de riesgo bajo y medio se priorizaron la educación ambiental, la vigilancia comunitaria, el monitoreo y la regulación de las quemas agropecuarias. Estas medidas coincidieron con los enfoques orientados a prevenir la creación de nuevos riesgos (MAATE, 2023b; United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2022). La prevención resultó especialmente relevante en un contexto donde una parte importante de los incendios estuvo asociada con prácticas humanas. La sensibilización y capacitación comunitaria pueden reducir las conductas de riesgo y fortalecer la detección temprana (Perea & García, 2024; M. Ramos et al., 2018).

Para las zonas de riesgo alto y muy alto se propusieron brigadas comunitarias, sistemas de alerta temprana, monitoreo de focos de calor, planes de contingencia y programas de restauración ecológica posincendio. Estas acciones fueron coherentes con enfoques que promueven la articulación entre monitoreo tecnológico, organización comunitaria, coordinación institucional y planificación preventiva (Bowman et al., 2020; Parra-Lara et al., 2025; UNDRR, 2022).

Sin embargo, el establecimiento de cortafuegos y la remoción de vegetación seca deben someterse a una evaluación técnica y ambiental previa, debido a que una aplicación inadecuada puede fragmentar la cobertura, alterar el suelo o afectar áreas ecológicamente sensibles. A pesar de la coherencia interna del procedimiento y de la validación espacial efectuada, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio.

Una de las principales restricciones fue la disponibilidad de información climática, debido a que los registros proporcionados por el INAMHI se limitaron al período 2016–2018. Esta extensión temporal restringió el análisis de tendencias climáticas de largo plazo y de la influencia de fenómenos extremos. También limitó la posibilidad de diferenciar variaciones coyunturales de patrones climáticos persistentes.

El número y la distribución espacial de las estaciones meteorológicas constituyeron otra fuente de incertidumbre. La baja densidad de estaciones en zonas montañosas pudo afectar la representación de los gradientes locales obtenidos mediante interpolación IDW. Además, los valores de precipitación utilizados deben interpretarse de acuerdo con su escala temporal exacta. La denominación como precipitación anual, mensual o estacional debe verificarse para evitar inconsistencias en la interpretación climática.

El modelo desarrollado correspondió a una evaluación multicriterio espacial mediante combinación lineal ponderada, cuyos resultados representaron un índice relativo de riesgo derivado de la integración de variables ambientales y antrópicas. Por tanto, el índice no constituyó una estimación probabilística de la ocurrencia futura de incendios, sino una representación comparativa de las condiciones territoriales observadas durante el período analizado.

Aunque se mencionó el proceso analítico jerárquico, la asignación uniforme del 20 % a cada variable no correspondió a una aplicación completa del AHP, debido a que no se efectuaron comparaciones por pares ni se calculó una razón de consistencia. En consecuencia, el procedimiento debe denominarse combinación lineal ponderada con pesos uniformes, salvo que el estudio incluya matrices de comparación, vectores propios y pruebas de consistencia no descritas en la metodología.

La ponderación uniforme redujo la subjetividad de asignar una importancia diferenciada sin respaldo empírico. Sin embargo, también asumió que todos los factores contribuyeron de manera equivalente al índice, supuesto que puede no representar su influencia real. Los estudios futuros deberían contrastar los pesos mediante consulta a expertos, métodos estadísticos, análisis de sensibilidad o algoritmos de aprendizaje automático. Esto permitiría evaluar la estabilidad de la zonificación frente a cambios en las ponderaciones.

La validación basada en la superposición de focos históricos permitió examinar la correspondencia espacial del modelo. Sin embargo, algunos de estos registros también formaron parte de la construcción del índice de amenaza, lo que pudo generar dependencia entre los datos de calibración y validación. Por ello, la concentración de eventos en las categorías altas no debe interpretarse como una validación predictiva completamente independiente. Futuros estudios deberían utilizar eventos no incorporados en la construcción del modelo o aplicar una separación temporal entre calibración y validación.

También debe considerarse que los focos de calor representan anomalías térmicas detectadas mediante sensores remotos y no necesariamente incendios forestales confirmados. Su verificación con reportes oficiales o trabajo de campo aumentaría la confiabilidad de la evaluación. Pese a estas limitaciones, la integración de registros históricos, teledetección, sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio permitió obtener una representación útil de las áreas con mayor riesgo relativo.

Esta información constituyó un insumo para orientar la planificación territorial, la prevención y la asignación inicial de recursos. No obstante, su aplicación operativa debería complementarse con verificaciones de campo y actualización periódica de las variables. Las investigaciones futuras podrían incorporar series climáticas más extensas, cartografía multitemporal de cobertura vegetal e imágenes satelitales con mayor resolución espacial y temporal.

También sería pertinente incluir información directa sobre prácticas agropecuarias, capacidad institucional, recursos de respuesta, antecedentes de restauración y percepción comunitaria del riesgo. La aplicación de modelos predictivos basados en aprendizaje automático podría complementar el análisis multicriterio. Estos métodos permitirían estimar relaciones no lineales, evaluar la importancia empírica de las variables y generar escenarios probabilísticos.

Se recomienda realizar análisis de sensibilidad, validaciones independientes y comparaciones entre diferentes métodos de interpolación y modelación. Estas mejoras permitirían evaluar la dinámica espaciotemporal del riesgo bajo escenarios de cambio climático y transformación del uso del suelo.

5. Conclusiones

La integración de variables climáticas, topográficas, biofísicas y antrópicas mediante técnicas de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica (SIG) permitió evaluar de manera integral la distribución espacial del riesgo de incendios forestales en el páramo de Navag. Las zonas con menor precipitación, pendientes más pronunciadas, coberturas susceptibles y usos agropecuarios

concentraron las categorías superiores de amenaza. Estos resultados evidenciaron que la configuración territorial del riesgo respondió a la interacción de factores ambientales y antrópicos, y no al efecto aislado de una sola variable.

La correspondencia entre las áreas intervenidas y los niveles superiores de amenaza confirmó la relevancia de las actividades humanas en la dinámica espacial del fuego. Sin embargo, la intervención antrópica no constituyó la única causa, debido a su interacción con las condiciones climáticas, topográficas y de disponibilidad de combustible vegetal. El riesgo de incendios forestales no dependió únicamente de las condiciones que favorecieron la ocurrencia y propagación del fuego, sino también de la exposición, la sensibilidad ecológica y la capacidad de respuesta y recuperación del territorio.

La incorporación de la vulnerabilidad permitió identificar sectores donde un incendio podría ocasionar efectos más severos sobre la estructura, el funcionamiento y los servicios ecosistémicos del páramo. Este enfoque evidenció la necesidad de integrar dichas dimensiones en la planificación territorial y la gestión sostenible. La validación espacial mostró una correspondencia favorable entre las categorías superiores de riesgo y la distribución de los registros históricos de actividad térmica. Este resultado respaldó la utilidad del modelo para identificar áreas prioritarias, aunque no constituyó una validación predictiva independiente ni una estimación probabilística de incendios futuros.

La zonificación obtenida permitió formular estrategias de gestión diferenciadas según el nivel relativo de riesgo. Las acciones propuestas comprendieron medidas de prevención, preparación, monitoreo, respuesta institucional y restauración ecológica. Esta diferenciación facilitó la priorización espacial de las intervenciones y la asignación inicial de recursos institucionales y comunitarios. Además, proporcionó criterios técnicos para fortalecer la vigilancia, la coordinación interinstitucional y la participación de las comunidades locales.

El principal aporte de la investigación consistió en integrar los componentes de amenaza y vulnerabilidad en un modelo espacial adaptado a las características de un ecosistema altoandino. Esta aproximación permitió superar los análisis centrados exclusivamente en la susceptibilidad territorial al fuego. La metodología desarrollada puede ser reproducida en otros ecosistemas de páramo, siempre que se adapte a la disponibilidad, calidad y escala temporal de la información local. Por tanto, los resultados constituyen un soporte técnico para orientar la conservación y el uso sostenible del páramo de Navag.

No obstante, la interpretación del modelo debe considerar las limitaciones asociadas con la extensión de las series climáticas, la utilización de cartografía de cobertura vegetal de 2022 y la asignación uniforme de pesos a las variables. Estas condiciones introdujeron incertidumbre en la representación temporal y en la importancia relativa de los factores. Las investigaciones futuras deberían incorporar series climáticas más extensas, cartografía multitemporal, humedad del suelo, velocidad y dirección del viento, carga y continuidad del combustible vegetal, y datos institucionales obtenidos directamente de los organismos responsables.

También se recomienda aplicar análisis de sensibilidad, validaciones independientes y modelos de aprendizaje automático. Estas mejoras permitirían estimar relaciones no lineales, fortalecer la capacidad explicativa y predictiva, y evaluar escenarios de cambio climático y transformación del uso del suelo. En conjunto, el estudio proporcionó una línea base para la gestión adaptativa del riesgo de incendios forestales en el páramo de Navag, al identificar las áreas prioritarias, los principales factores condicionantes y las medidas de intervención compatibles con los niveles territoriales de riesgo.

Referencias

- Bowman, D., Kolden, C., Abatzoglou, J., Johnston, F., van der Werf, G., & Flannigan, M. (2020). Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 500–515. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3>
- Bustamante, M., Albán, M., & Argüello, M. (Eds.). (2011). *Los páramos de Chimborazo: Un estudio socioambiental para la toma de decisiones*. Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo, EcoCiencia y Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina. <https://n9.cl/x3e6s>
- Camargo-García, J., Dossman, M., Rodríguez, J., Arias, L., & Galvis-Quintero, J. (2012). Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica*, 61(2), 151–165. <https://n9.cl/fmizj>
- Carrasco, R., & Núñez, M., (2019). Los incendios forestales y su impacto ambiental en reservas ecológicas. *Explorador Digital*, 3(3), 104–113. <https://doi.org/10.33262/exploradordigital.v2i1.324>
- Cisneros-Vaca, C., Calahorrano, J., Abarca, M., & Manzano, M. (2023). Semiautomatic detection of burnt areas in Chimborazo-Ecuador using dNBR mean composites with adjusted thresholds. *Revista de Teledetección*, (62), 89–99. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19428>
- Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos. (2024). *SitRep No. 04: Incendios forestales, del 1 de enero a la fecha (3 de junio de 2024)*. Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. <https://n9.cl/7jq84e>
- Gigović, L., Pourghasemi, H., Drobnjak, S., & Bai, S. (2019). Testing a new ensemble model based on SVM and random forest in forest fire susceptibility assessment and its mapping in Serbia's Tara National Park. *Forests*, 10(5), Article 408. <https://doi.org/10.3390/f10050408>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Colta [GAD COLTA]. (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Colta 2024–2030*. <https://n9.cl/9ricd>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2025). Datos meteorológicos de precipitación y temperatura de la provincia de Chimborazo (periodo 2016–2018). Archivo digital de la Dirección de Pronósticos Meteorológicos. <https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-metereologicos/>
- Jones, M., Abatzoglou, J., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A., Burton, C., Betts, R., van der Werf, G., Sitch, S., Canadell, J., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S., & Le Quéré, C. (2022). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60(3), Article e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Keeley, J., & Syphard, A. (2021). Large California wildfires: 2020 fires in historical context. *Fire Ecology*, 17, Article 22. <https://doi.org/10.1186/s42408-021-00110-7>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2023a). *Plan de acción nacional para la conservación, restauración y uso sostenible de los páramos*. <https://n9.cl/nuord6>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2023b, agosto 16). *Gobierno Nacional presentó campaña de prevención de incendios forestales*. <https://n9.cl/k685vq>
- Misacango, L., (2022). *Efectos socioeconómicos de los incendios forestales en la parroquia Molleturo* [Trabajo de titulación de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://n9.cl/7koy90>

- Ocampo-Zuleta, K., & Parrado-Rosselli, Á. (2023). Functional diversity in an Andean subpáramo affected by wildfire in Colombia. *Plant Diversity*, 45(4), 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.11.007>
- Parra-Lara, Á., Uribe Castro, H., & Parra-Muñoz, E. (2025). Incendios de cobertura vegetal, biodiversidad y gobernanza. *Revista Controversia*, (224), 1–15. <https://doi.org/10.54118/controver.vi224.1360>
- Pausas, J., & Keeley, J. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289–295. <https://doi.org/10.1002/fee.2044>
- Perea, M., & García, W. (2024). Propuesta para la prevención, mitigación y control de incendios forestales. *Revista Social Fronteriza*, 4(1), e41183. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(1\)183](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)183)
- Pizarro, R., Ramírez, C., & Flores, J. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque*, 24(3), 31–38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>
- Plaza, G., Tumbaco, D., Santillán, E., & Vallejo, V. (2022). Reforestación de zonas afectadas por incendios forestales en el cantón Riobamba, Ecuador. *InnDev*, 1(1), 9–20. <https://doi.org/10.69583/innde.v1n1.2022.29>
- Ramos, M., Baque, M., Jiménez, A., Pionce, G., & Manrique, T. (2018). Programa de comunicación sobre prevención de incendios forestales en el cantón Paján, Manabí, Ecuador. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 16(31), 115–132. <https://doi.org/10.15359/prne.16-31.6>
- Ramos, R., Máximo, P., Montiel, B., & González, Y. (2008). Modelación de isolíneas meteorológicas y cálculo del gradiente térmico para la ciudad de Puebla (México) durante el periodo junio 2005–2006 con apoyo de imágenes satelitales. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(1), 9–19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69550104>
- Ríos, J. (2023). Causas y origen de los incendios forestales en el Ecuador. *InnDev*, 2(4), 11–21. <https://doi.org/10.69583/innde.v2n4.2023.79>
- Sarango-Cobos, J., Muñoz, J., Muñoz, L., & Aguirre, Z. (2019). Impacto ecológico de un incendio forestal en la flora del páramo antrópico del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 101–114. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/687>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR]. (2022). *Global assessment report on disaster risk reduction: Our world at risk—Transforming governance for a resilient future 2022*. United Nations. <https://www.undrr.org/gar2022-our-world-risk-gar>
- Villacís, F., Lizano, K., Toapanta, J., & Chango, M. (2022). Los incendios forestales y su prevención en el Ecuador. *InnDev*, 1(1), 21–35. <https://doi.org/10.69583/innde.v1n1.2022.32>
- Zhiminaicela, J., Lima, K., Quevedo, J., García, R., & Rogel, B. (2021). Incendios forestales: Un factor influyente en la degradación de la biodiversidad del cantón Chilla, Ecuador. *Revista Científica del Amazonas*, 4(7), 1–12. <https://doi.org/10.34069/RA/2021.7.01>

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Bryan José Ordoñez Bustamante: Conceptualización, software, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Marco Vinicio Rodríguez Llerena: metodología, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.