

RIESGO DE INCENDIO DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL PARQUE NATURAL REGIONAL CORTADERA, BOYACÁ, COLOMBIA

Albaluz Ramos-Franco ^{1*}, William Bernal-Suarez ¹ y Jhonatan Becerra-Duitama ¹

1. Grupo de Investigación Ciencia, Innovación y Tecnología, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja (Boyacá), Colombia.

*Autor de correspondencia: aramosf@jdc.edu.co

DOI:
<https://doi.org/10.55467/reder.v10i1.217>

RECIBIDO
8 de julio de 2024

ACEPTADO
7 de marzo de 2025

PUBLICADO
1 de enero de 2026

Formato cita Recomendada (APA):
Ramos-Franco, A., Bernal-Suarez, W. & Becerra-Duitama, J. (2026). Riesgo de Incendio de la Cobertura Vegetal en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 10(1), 215-226. <https://doi.org/10.55467/reder.v10i1.217>

RESUMEN

Los eventos de fuego en ecosistemas de alta montaña andina están incrementando en la medida que las coberturas vegetales nativas son reemplazadas por actividades agropecuarias y fenómenos climáticos como ENSO son más intensos. El presente estudio busca evaluar las zonas del Parque Natural Regional Cortadera de jurisdicción del municipio de Toca (Boyacá) con mayor riesgo de incendio de cobertura vegetal, partiendo del análisis de la amenaza y la vulnerabilidad. Para ello, se realizó un análisis de información geográfica que integró variables como susceptibilidad de la cobertura vegetal, precipitación, temperatura, pendientes, frecuencia histórica de conflagraciones, vulnerabilidad poblacional, territorial, patrimonial y económica; a través de álgebra de mapas se obtuvo el índice de riesgo de incendio. Los resultados indican que en la zona de estudio hay un total de 71,57 hectáreas en riesgo alto y 50,93 con riesgo muy alto, correspondientes al sector suroriental de la vereda Chorrera y el sector suroccidental de la vereda Cunucá del municipio de Toca. Este estudio confirma que, en los ecosistemas de páramo andino colombiano, la presencia de plantaciones forestales con especies introducidas de regiones no tropicales, pasturas de ganadería y cultivos tradicionales aumenta la probabilidad de ocurrencia y duración de conflagraciones de la cobertura vegetal.

PALABRAS CLAVES

Incendio; amenaza; Vulnerabilidad; Uso del suelo; Páramo; Colombia

LAND COVER FIRE RISK AT CORTADERA REGIONAL NATURAL PARK, BOYACA, COLOMBIA

ABSTRACT

Fire events in high Andean Mountain ecosystems are increasing as native vegetation cover is being replaced by agricultural activities and climatic phenomena such as ENSO are becoming more intense. The present research aims to evaluate the regions of the Cortadera Regional Natural Park under the jurisdiction of the municipality of Toca (Boyacá) with the highest risk of vegetation cover fire, based on the analysis of the threat and vulnerability. To this end, a geographic information analysis was conducted that integrated variables such as vegetation cover susceptibility, precipitation, temperature, slopes, historical frequency of conflagrations, population, territorial, heritage, and economic vulnerability; through map algebra, the vegetation cover fire risk index was obtained. The results indicate that in the study area, there is a total of 71.57 hectares at high risk and 50.93 at very high risk, corresponding to the southeastern sector of the Chorrera neighborhood and the southwestern sector of the Cunucá neighborhood in the municipality of Toca. This study confirms that, in the Andean páramo ecosystems of Colombia, the presence of forest plantations, with species introduced from non-tropical regions, livestock pastures, and traditional crops increases the likelihood and duration of vegetation cover conflagrations.

KEYWORDS

Wildfire; Hazard; Vulnerability; Land use; Paramo; Colombia



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

INTRODUCCIÓN

La disminución de la cobertura vegetal en los páramos neotropicales responde a una compleja interacción entre actividades antropogénicas y procesos naturales. Entre las causas humanas destaca la colonización histórica, que ha impulsado cambios en el uso del suelo (LULC), como la sustitución de vegetación nativa por pastizales y cultivos (Young, 2009). Este fenómeno no solo reduce las poblaciones de especies endémicas (Peters et al., 2010), sino que también transforma la estructura ecológica de estos ecosistemas. Un claro ejemplo se observa en Ecuador, donde más del 50% de las áreas montañosas de páramo se destinan a actividades agropecuarias (Suarez et al., 2022), perpetuando un ciclo de degradación.

Además, la introducción de especies exóticas (e.g., eucalipto y pino) para fines maderables ha acelerado el reemplazo de la flora nativa, incrementando la homogeneización del paisaje. Este patrón se replica en Colombia, donde, entre 1989 y 2016, los límites urbanos de los páramos de Sumapaz y Chingaza experimentaron una expansión agrícola del 23%, acompañada de una pérdida del 15% en coberturas naturales (Anselm et al., 2018). Tales alteraciones no son superficiales: estudios como el de Buytaert et al. (2006) demuestran que prácticas como el pastoreo intensivo y las plantaciones maderables modifican drásticamente los regímenes hidrológicos, afectando la disponibilidad y calidad del agua en regiones andinas.

A estas presiones se suma el cambio climático, que altera los patrones de precipitación y temperatura, condicionando la distribución de especies vegetales (Diazgranados et al., 2021). Esta combinación de factores antrópicos y climáticos, amenaza funciones críticas de los páramos, como su rol en la regulación hídrica. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], (2012), estos ecosistemas aportan el 70% del agua para consumo humano y generación hidroeléctrica en Colombia, lo que subraya la urgencia de priorizar su conservación en políticas públicas.

Además, se ha observado el impacto del cambio climático en la vegetación del páramo en Colombia, con proyecciones que indican importantes consecuencias socioeconómicas y ambientales; Manciu et al., (2023) han cuantificado la interacción entre LULC y el calentamiento global durante los eventos ENSO, demostrando que el cambio climático causa un aumento de la temperatura media, que es más pronunciado en altitudes mayores. Los Andes del Norte suelen presentar una disminución de las precipitaciones asociada con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), generando condiciones favorables para los incendios en las cordilleras colombianas: el proceso de transición entre El Niño y La Niña en el Pacífico central altera los regímenes de humedad y temperatura en los Andes, creando ventanas críticas para incendios. Durante El Niño, la sequía extrema deseca la vegetación, mientras que, en la transición a La Niña, las lluvias erráticas y las fluctuaciones térmicas impiden la recuperación de los ecosistemas, dejando biomasa residual inflamable (Amaya-Villabona y Armenteras, 2012; Borrelli, et al., 2015). Esta dinámica, intensificada por el cambio climático, explica el 35% del aumento de incendios en páramos intervenidos (Zubieta et al., 2021; Manciu et al., 2022).

El año 2020 fue especialmente crítico para las comunidades rurales que habitan y dependen de los páramos. De acuerdo con cifras oficiales, en Colombia se registraron 179 incendios forestales en menos de 6 meses, de los cuales 20 afectaron ecosistemas de páramo en el departamento de Boyacá, ubicado en el centro-oriente del país. Estos incendios consumieron aproximadamente 947 hectáreas de vegetación, incluyendo poblaciones de Espeletia y sus asociaciones (Rojas Hernández, 2020).

En particular, la región paramuna de los municipios de Toca y Pesca, localizados a 15 km y 35 km al sureste de Tunja, capital de Boyacá, respectivamente, no fue la excepción. En febrero de ese año, una conflagración iniciada en límites del Parque Natural Regional Cortadera (PNRC) consumió cerca de 100 hectáreas de vegetación nativa. Este evento, exacerbado por altas temperaturas y vientos fuertes persistentes desde enero (Caracol Radio, 2020), ocurrió en una zona de importancia hídrica, próxima al complejo de lagunas altoandinas que abastecen la cuenca del río Chicamocha. Cabe destacar que el PNRC se sitúa en el altiplano boyacense, entre los 2.350 y 3.850 msnm, un área clave para la recarga de acuíferos y la regulación climática regional (Morales et al., 2011).

A raíz de estos acontecimientos, surge la necesidad de evaluar las zonas del PNRC con mayor riesgo de incendio de cobertura vegetal, integrando un análisis multidimensional de amenazas (climáticas, antrópicas) y vulnerabilidades (ecológicas, socioeconómicas). Este estudio no solo busca identificar áreas prioritarias para la instalación de un sistema autónomo de alerta temprana, sino también generar insumos técnicos para la planificación territorial que orienten políticas de conservación y manejo adaptativo de usos del suelo en páramos; asimismo, caracterizar los impactos acumulativos de actividades como la ganadería, las plantaciones forestales y la expansión agrícola en la inflamabilidad del ecosistema. La investigación se enmarca en el proyecto “Acciones para la mitigación de incendios forestales en el distrito de riego del Alto Chicamocha basadas en una iniciativa comunitaria de CTel en el marco de adaptación al cambio climático”, y sus resultados aportarán a fortalecer la resiliencia comunitaria, vinculando el conocimiento científico con prácticas ancestrales de manejo del fuego, en el marco de estrategias de adaptación al cambio climático; la restauración de áreas degradadas mediante la priorización de especies nativas con baja carga combustible, así como la zonificación de actividades productivas compatibles con la conservación del páramo, que procuran la articulación de agendas institucionales (corporaciones autónomas, alcaldías) y comunitarias para la gestión integral del riesgo.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Se desarrolló en inmediaciones del Parque Natural Regional Cortadera, en el complejo de páramos Tota - Bijagual Mamapacha, en las veredas Cunucá y Chorrera del municipio de Toca y las veredas Corazón y Puerta Chiquita del municipio de Pesca en el departamento de Boyacá (Figura 1). Esta área posee un rango altitudinal entre los 2.350 hasta los 3.850 msnm, una temperatura media de 13°C y una precipitación total media multianual de 786 mm (Morales et al., 2011). Es un área de esencial importancia del departamento por su aporte a la recarga y regulación hídrica de la cuenca alta del río Chicamocha y el embalse La Copa.

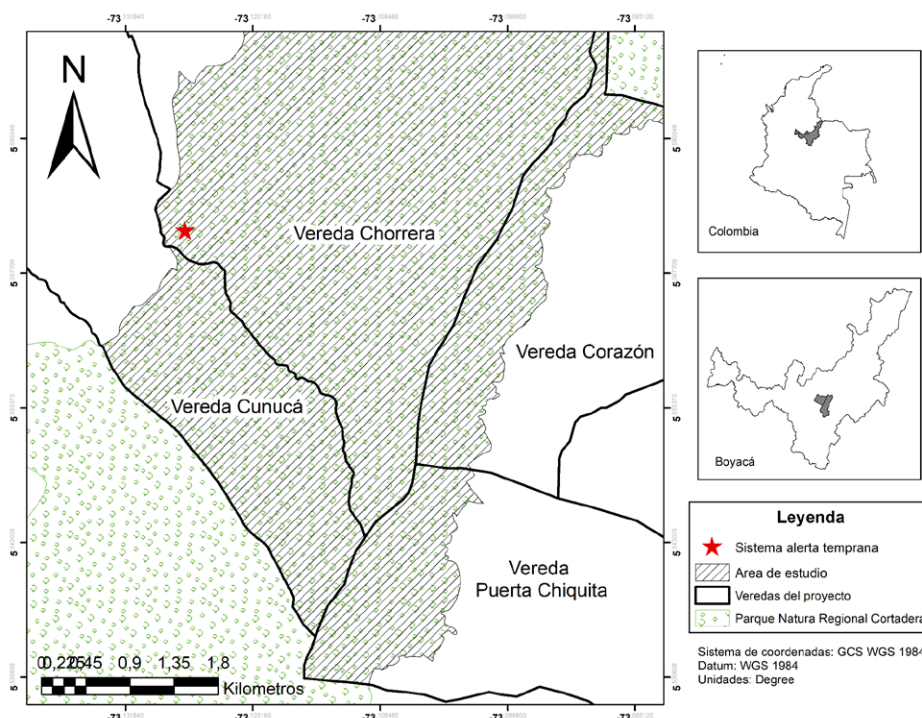


Figura 1. Localización del área de estudio
Fuente: Autores, 2026.

Zonificación del riesgo

Para evaluar el riesgo de incendios de la cobertura vegetal (RICV) del área de estudio, se utilizó la metodología recomendada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2011) a partir de los factores de amenaza y vulnerabilidad. La amenaza corresponde al peligro latente que representa la posible manifestación de fuego en la cobertura vegetal, el cual

puede ser de origen natural, socio-natural o antropogénico, en un territorio particular; se expresa como la probabilidad de que un incendio se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un tiempo definido. La vulnerabilidad es la predisposición de un elemento a ser afectado, a sufrir daño y encontrar dificultad de recuperarse a partir de un evento de fuego; se interpreta como la probabilidad de afectación física, económica, política o social que tiene una comunidad o un grupo de elementos de sufrir efectos adversos en el caso de que se presente una conflagración. Por último, el riesgo es la probabilidad de que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un territorio particular y durante un lapso definido de tiempo, por la acción de un incendio de origen natural o antrópico; es el resultado de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Análisis de amenazas:

El análisis de amenaza inició con la zonificación y calificación de la susceptibilidad de la cobertura vegetal, considerando atributos intrínsecos como la carga de combustibles, la disposición espacial y la combustibilidad, de acuerdo con lo establecido por Páramo (2007). Para ello, se utilizaron insumos cartográficos base disponibles en los portales geográficos oficiales del IDEAM (2024), entre los que destacan el mapa de coberturas de la tierra (escala 1:100.000, año 2022) para identificar tipos de vegetación, los datos de biomasa aérea del proyecto BioCarbono Colombia (2020) expresados en ton/ha como aproximación de la carga de combustibles, y las series históricas de humedad de combustibles (IDEAM, 2000-2023) para estimar la duración del material inflamable.

A partir de estos insumos, se generaron tres capas ráster mediante reclasificación en ArcGIS 10.8. La capa de tipo de combustibles se categorizó siguiendo una adaptación de la metodología de Scott & Burgan (2005) a ecosistemas altoandinos, tal como se detalla en la Tabla 1. La carga de combustibles se clasificó en cinco intervalos (0-5) basados en umbrales de biomasa (Tabla 2), mientras que la duración de combustibles se derivó del tiempo de secado promedio por tipo de cobertura, validado con mediciones in situ (Tabla 3). Finalmente, se aplicó álgebra de mapas para integrar estas capas, asignando pesos específicos a cada variable según su contribución al riesgo de ignición, tal como se expresa en la ecuación 1.

Tipo de cobertura	Tipo de combustible	Categoría de amenaza	Calificación
Suelos desnudos, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	Muy baja	1
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	Árboles	Baja	2
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado	Arbustos	Moderada	3
Herbazales y cultivos herbáceos	Hierbas	Alta	4
Pastos limpios/enmalezados y zonas verdes urbanas	Pastos	Muy alta	5

Tabla 1. Clasificación del tipo de combustibles según el tipo de cobertura
Fuente: Autores, 2026.

Carga total de combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
No combustibles (Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales)	Muy baja	0
Menos de 1 ton/ha (zonas verdes urbanas)	Baja	1
1-50 ton/ha (Herbazales, cultivos herbáceos, pastos enmalezados y limpios)	Moderada	2
50-100 ton/ha (Arbustos, arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado)	Alta	3
Más de 100 ton/ha (Bosques fragmentados, bosques densos y abiertos, altos y bajos)	Muy alta	4

Tabla 2. Carga total de combustibles según biomasa del tipo de cobertura
Fuente: Autores, 2026.

Tipo de cobertura	Duración de los combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	Muy baja	0
Zonas verdes urbanas, pastos limpios, herbazales, cultivos herbáceos, pastos enmalezados	1 hora	Baja	1
Arbustal abierto, herbazal con arbustos y/o arbolado, arbustales, mosaicos con espacios naturales	10 horas	Moderada	2
Bosques fragmentados, bosques densos y abiertos, altos y bajos	100 horas	Alta	3

Tabla 3. Duración del combustible según tipo de cobertura
Fuente: Autores, 2026.

Posteriormente, se integraron variables climáticas asociadas a condiciones propicias para incendios, como el déficit de precipitación y las temperaturas máximas anómalas, las cuales reducen la humedad de la vegetación y aumentan su inflamabilidad. Para ello, se analizaron series temporales (2000-2023) de diez estaciones meteorológicas ubicadas en la represa La Copa y los municipios de Tunja, Paipa, Cúmbita, Cuitiva y Rondón. Los datos de precipitación y temperatura se interpolaron espacialmente mediante el método de Kriging ordinario en ArcGIS 10.8, generando capas ráster que representan anomalías respecto al promedio histórico.

Adicionalmente, se incorporó la pendiente del terreno como factor de propagación de incendios. A partir de un modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 30 m, se calculó un mapa de pendientes reclasificado en cuatro intervalos: <7% (muy baja), 7-12% (baja), 12-25% (moderada) y 25-75% (alta). Por último, para evaluar la frecuencia histórica de incendios, se recopilieron registros del cuerpo de bomberos de Toca correspondientes a la última década (2013-2023). Estos datos se digitalizaron y transformaron a formato ráster, asignando valores de 0 (sin eventos) a 5 (máxima frecuencia) por vereda.

El álgebra de mapas para obtener un ráster que exprese la Amenaza Total (IDEAM, 2011) está expresado por:

Ecuación 1

$$\text{Amenaza total} = \text{susceptibilidad de la vegetación} \times (0,17) + \text{precipitación} \times (0,20) \\ + \text{temperatura} \times (0,20) + \text{pendientes} \times (0,07) + \text{frecuencia} \times (0,10)$$

Una vez realizada la respectiva suma ponderada (0,74), se procede a realizar una distribución de frecuencias en 5 rangos para así llegar a categorizar el grado de amenaza entre muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Análisis de vulnerabilidad:

Esta fase implicó la obtención de información relacionada con la vulnerabilidad poblacional, territorial, patrimonial y económica. La vulnerabilidad poblacional correspondió con la ocupación o grado de presencia de la población en un área, que determina el mayor o menor grado de exposición ante un evento de fuego; así, se elaboró una capa con base en la información disponible del censo nacional de población y vivienda (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2024) a partir de la densidad de población por municipios, con calificación desde 1 (muy baja) hasta 5 (muy alta).

La vulnerabilidad territorial, entendida como los cambios físicos del suelo ocasionados por factores naturales y antrópicos asociados a las dinámicas de los asentamientos humanos, las dinámicas socioeconómicas (que degradan el territorio o el paisaje), así como las características del medio ambiente natural, que disminuyen su nivel de protección frente a las amenazas a que están expuestos; para la elaboración de la capa fue necesario analizar la vulnerabilidad física y ecológica.

En la primera, se utilizó como criterio el conflicto del suelo registrado en la información oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] (2024) generando niveles del 1 al 4 respectivamente: Uso adecuado, Subutilización, Sobreutilización y Conflictos en tierras de régimen jurídico especial. Para evaluar la vulnerabilidad ecológica, es necesario entender el grado de adaptación que tienen los ecosistemas ante el fuego, para lo cual se utilizaron los criterios postulados por Parra Lara (2011), con calificaciones desde 0 hasta 5 respectivamente: No influidos por el fuego/no combustibles, Dependientes del fuego, Influidos por el fuego, Sensibles al fuego, Independientes del fuego.

Finalmente, para la capa de vulnerabilidad territorial, se realizó una suma ponderada de las categorías obtenidas en las coberturas de la tierra distribuidas en el área de estudio para vulnerabilidad física y ecológica, creando una clasificación de 1 a 5, desde muy baja a muy alta.

La vulnerabilidad patrimonial se interpretó como la fragilidad de las áreas de importancia patrimonial tanto natural (áreas protegidas), como histórico, artístico, cultural o religioso (parques arqueológicos, monumentos, etc.) ante la ocurrencia de un incendio de la cobertura vegetal; se elaboró una capa con niveles del 1 al 4 de acuerdo con el valor del elemento: Sin valor, Bajo, Medio y Alto valor patrimonial.

Por último, se incluyó la vulnerabilidad económica a partir del uso actual de la tierra, haciendo una selección a criterio experto de aquellas áreas de importancia en la producción de bienes y servicios que pudiesen ser afectadas por la incidencia de incendios de la cobertura vegetal, de este modo se puede calificar los cuerpos de agua como Muy baja (1), las zonas naturales y de conservación como baja (2), las zonas urbanas, zonas mineras, industriales y comerciales como moderada (3), las zonas forestales y de cultivos arbóreos como alta (4) y por último las zonas agrícolas y ganaderas con muy alta vulnerabilidad (5).

La obtención de la Vulnerabilidad total para la zona de estudio requiere la normalización de las variables detalladas anteriormente, así:

Ecuación 2

$$\text{Variable normalizada} = (X - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min})$$

Donde:

X: Valor de la variable

Min: Mínimo valor de la variable dentro del rango contenido en el mapa

Max: Máximo valor de la variable dentro del rango contenido en el mapa

De este modo, se obtiene una escala de 1 (muy baja), 2 (baja), 3 (moderada), 4 (alta) y 5 (muy alta) la cual se asignó a los valores en la capa denominada Vulnerabilidad total.

Finalmente, la zonificación del RICV implica el álgebra de mapas de las capas finales creadas a partir de cada factor, con una multiplicación ponderada en 5 rangos de frecuencia del 1 al 5, desde muy baja (1) hasta muy alta (5).

Ecuación 2

$$\text{Riesgo} = (\text{amenaza total} \times \text{vulnerabilidad total})$$

La capa de coberturas de la tierra utilizada para el preprocesamiento, basada en el sistema Corine Land Cover nivel 2, indica una distribución de herbazal abierto (2.515 ha), mosaico de cultivos (596 ha), arbustal abierto (443,7 ha), pastos enmalezados (114 ha) y plantaciones forestales (37,8 ha). Estas cifras coinciden con los patrones reportados por Anzoategui et al. (2023) para ecosistemas de páramo intervenidos en el altiplano boyacense, donde predominan usos agropecuarios y fragmentación de hábitats nativos.

El grado de amenaza total para la zona de estudio oscila entre 2,47 y 3,91 en una escala de 1 a 5, es decir, de baja a moderada, siendo predominantes las áreas de amenaza moderada; en la figura 3 se puede observar la distribución de las áreas, producto del álgebra de mapas; las zonas en blanco corresponden a píxeles sin información de base. Por otra parte, la vulnerabilidad total para la zona de estudio se encuentra entre 1,06 y 3,2 en una escala de 1 a 5, es decir, se encuentran zonas con vulnerabilidad muy baja, baja y moderada, siendo la primera dominante. En la figura 4

se puede observar su distribución. Por último, el producto de la amenaza y la vulnerabilidad indica que 815,89 ha se encuentran en riesgo muy bajo por incendio de cobertura vegetal, seguido de 274,03 ha con riesgo bajo; por su parte 255,94 ha tienen riesgo moderado, pero 71,57 y 50,93 ha tienen riesgo alto y muy alto respectivamente. De acuerdo con la figura 5, se puede indicar que en el sector suroriental de la vereda Chorrera y el sector suroccidental de la vereda Cunucá, se concentra el mayor RICV, mientras que los sectores norte de las veredas Corazón y Puerta Chiquita tienen el menor RICV.

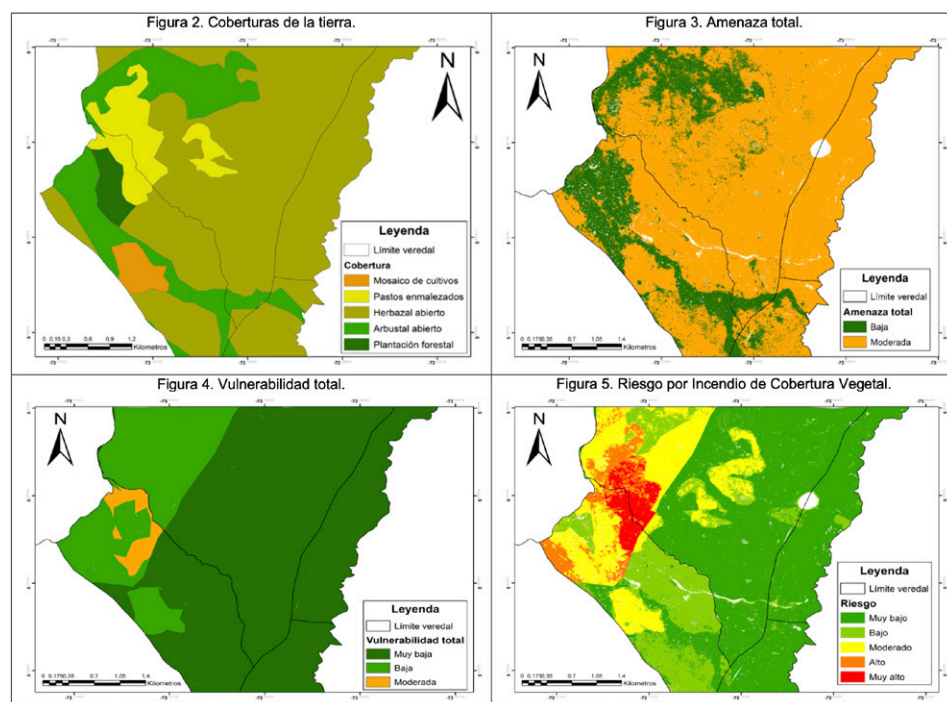


Figura 2. Resultados del álgebra de mapas

Fuente: Autores, 2026.

Notas: a) Coberturas de la tierra, b) Amenaza total, c) Vulnerabilidad total, d) Riesgo por incendio de cobertura vegetal.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman que la interacción entre actividades humanas, coberturas vegetales inflamables y condiciones climáticas extremas determina el riesgo de incendios. Para el caso puntual, las áreas identificadas con riesgo alto y muy alto (122,5 ha en total), ubicadas en el sector suroriental de la vereda Chorrera y suroccidental de Cunucá, coinciden con zonas donde predominan pastos enmalezados, plantaciones forestales de pino (*Pinus patula*) y pendientes moderadas (12-25%). Estos hallazgos refuerzan lo documentado por Anzoategui et al. (2023) para páramos intervenidos, donde la sustitución de vegetación nativa por coberturas antrópicas incrementa la carga combustible y la probabilidad de ignición. Sin embargo, el presente análisis espacial agrega una capa crítica: la vulnerabilidad socioecológica en estas áreas no solo deriva de la vegetación, sino también de conflictos de uso del suelo, como la expansión no regulada de cultivos y la ausencia de planes de manejo adaptativos.

La zona de estudio ha sido objeto de intervención antrópica durante años; de acuerdo a conversaciones con habitantes del sector durante la realización del proyecto (Burgos, A., Melo, G., comunicación personal, 26 de enero de 2024), las autoridades ambientales con jurisdicción en el PNRC solían realizar jornadas de reforestación en predios de propiedad estatal, con especies maderables como pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*), las cuales se propagaron de manera exitosa, al punto de colonizar herbazales abiertos y arbustales; por lo tanto, no es extraño encontrar las calificaciones de riesgo más altas donde se hicieron dichas plantaciones. La presencia del pino como una especie introducida para fines maderables es un aspecto bastante descrito para Colombia (Federación Nacional de Industriales de Madera [Fedemaderas], 2024), además de ser un fuerte competidor por el espacio con ayuda de alelopatías (Ballester et al., 2011), la hojarasca acicular puede presentar valores desde los 37,81 mg ha⁻¹ hasta los 16,81 ton ha⁻¹ de carga combustible (Granda Armijos, 2024); así mismo, el tiempo de descomposición de la biomasa

de especies de origen templado es mucho más largo que el de las especies nativas (Xelhuantzi Carmona, et al., 2011), agravando la condición pirófila de la especie más allá de su biomasa en pie.

Por otra parte, las especies propias de páramo con portes bajos, especialmente los rosetones, resultan ser extremadamente susceptibles al fuego, debido al potencial combustible de su necromasa, contribuyendo a la propagación de las llamas y a la permanencia del fuego en el tiempo (Ramsay, 2014). Es importante resaltar que los páramos tropicales son sistemas fuego dependientes (Horn y Kappelle, 2009), y que las especies con morfología de rosetón como las Espeletias están adaptadas para modificar sus tasas de crecimiento individual y poblacional de acuerdo a los regímenes naturales de fuego, que suelen ser de 10 años en páramos secos y de 50 años en páramos húmedos (Horn 1989, Horn y Kappelle 2009, Cárdenas et al, 2013); para el caso concreto, de acuerdo a la información suministrada por el cuerpo de bomberos de Toca, los dos últimos eventos de fuego en la región tuvieron origen antrópico accidental, adyacente a las plantaciones de pino; esto se traduce en una alteración del régimen natural para el sector, que aunque puede no ser devastador para las poblaciones de Espeletia, altera significativamente los procesos hidrológicos y la salud del suelo (Poulenard et al., 2001; Buytaert et al., 2006; Harden, 2006; Ramsay, 2014).

Los pastos enmalezados se describen cómo “tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono” (código 2.3.3 en la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, IDEAM, 2010); en la presente investigación se encontraron 114,3 hectáreas bajo esta categoría, contiguas a las plantaciones forestales, las cuales son aprovechadas por los campesinos de la región para rotar la producción bovina multipropósito, generando un incremento significativo en el valor del RICV a muy alto, explicado por la inflamabilidad y la carga de combustible que poseen.

Se afirma entonces que el Parque Natural Regional Cortadera (PNRC), ubicado en el departamento de Boyacá (Colombia), enfrenta una creciente amenaza de incendios de cobertura vegetal, impulsada por la combinación de actividades humanas, especies exóticas invasoras y los efectos del cambio climático. Para abordarlo, se requieren medidas de manejo inmediatas centradas en las áreas de mayor riesgo: las 122,5 hectáreas identificadas con riesgo alto y muy alto, localizadas en el sector suroriental de la vereda Chorrera y suroccidental de Cunucá, demandan acciones prioritarias como la creación de franjas cortafuegos de 30 metros de ancho con especies nativas como Espeletia spp., cuyas estructuras compactas y bajo contenido de resinas reducen la propagación del fuego, tal como lo respalda Ramsay (2014) en estudios sobre la morfología de rosetones en páramos. Adicionalmente, es urgente la erradicación controlada de plantaciones de pino (*Pinus patula*), que cubren 37,8 hectáreas y acumulan cargas combustibles de hasta 16,81 toneladas por hectárea debido a la lenta descomposición de sus acículas (Granda Armijos, 2024). Este proceso, que incluye técnicas como el anillado de árboles y la aplicación localizada de herbicidas, deben acompañarse de la restauración con especies pioneras nativas (*Baccharis latifolia*) para recuperar la funcionalidad ecológica del suelo (Ballester et al., 2011).

A su vez, las 114,3 hectáreas de pastos enmalezados, clasificadas como vegetación secundaria según el IDEAM (2010), requieren un plan de rotación ganadera sostenible; limitar el pastoreo en pendientes superiores al 12% e implementar sistemas silvopastoriles en zonas planas no solo disminuiría la carga combustible, sino que también reduciría la presión sobre suelos frágiles, tal como lo demostró Buytaert et al. (2006) en estudios sobre el impacto antrópico en la hidrología de páramos. La participación comunitaria es clave en este proceso, por ello se recomienda capacitar a los habitantes de Toca y Pesca en el uso de plataformas como Global Forest Watch para reportar incendios en tiempo real fortalecerá la gobernanza local.

Las proyecciones climáticas para la región añaden urgencia a estas acciones; de acuerdo al modelo de Diazgranados et al. (2021), para 2050 la temperatura media en el PNRC aumentará 1.5°C y las precipitaciones disminuirán un 20% durante eventos de El Niño, lo que extenderá las sequías y elevará la frecuencia de incendios en un 40% (Zubieta et al., 2021). Para adaptarse, se propone una reforestación climáticamente inteligente con especies nativas tolerantes a la sequía, como *Puya goudotiana*, en corredores entre 3.000 y 3.500 msnm. Estas especies, adaptadas a condiciones extremas, no solo mitigarán el riesgo de incendio, sino que también protegerán la recarga hídrica de acuíferos críticos para la cuenca del Chicamocha. Complementariamente,

la integración de datos satelitales con pronósticos del IDEAM permitirá desarrollar sistemas de alerta remota temprana precisos, activando protocolos preventivos antes de que se desencadenen condiciones críticas.

La gestión del PNRC debe trascender enfoques técnicos y abordar las tensiones socioambientales subyacentes; un ejemplo claro es el sector noroccidental del parque, donde la expansión agropecuaria en áreas protegidas sin una zonificación clara (Registro Único Nacional de Áreas Protegidas [RUNAP], 2024) ha generado un conflicto de uso del suelo que se refleja en un incremento abrupto del RICV. Este fenómeno surge de la coexistencia de actividades productivas (ganadería, cultivos) y áreas de conservación, marcando una división entre zonas de uso alto y uso muy bajo, agravada por la ausencia de instrumentos de planeación como los exigidos en el Decreto 2372 de 2010. Cabe destacar que, en Colombia, las figuras de áreas protegidas (AP) son herramientas de restricción al uso del suelo, más no figuras de propiedad (Ramos-Franco et al., 2021), esto explica por qué comunidades locales, dueñas de predios dentro del AP, desarrollan actividades económicas tradicionales que contradicen los objetivos de conservación. La solución radica en implementar el plan de manejo ambiental con los tres componentes obligatorios del citado decreto, especialmente la zonificación participativa, en donde se delimite áreas permitidas para usos sostenibles como el silvopastoreo y zonas de exclusión en pendientes críticas.

CONCLUSIONES

El Parque Natural Regional Cortadera enfrenta un riesgo creciente de incendios debido a la convergencia de factores antrópicos, ecológicos y climáticos. La introducción histórica de especies exóticas como el pino, junto con prácticas agropecuarias no reguladas, ha transformado el paisaje, incrementando la inflamabilidad del ecosistema. Estas intervenciones, sumadas a la expansión de pastos enmalezados y la falta de zonificación clara, generan condiciones propicias para incendios recurrentes. La vulnerabilidad socioecológica se agrava por la ausencia de planes de manejo adaptativos, que integren tanto la protección de la vegetación nativa como los rosetones de Espeletia, adaptados a regímenes naturales de fuego, como el control de especies invasoras. Para mitigar este riesgo, es prioritario implementar estrategias que combinen restauración ecológica con participación comunitaria, promoviendo prácticas sostenibles y sistemas de monitoreo colaborativo que fortalezcan la resiliencia local ante eventos extremos.

Ante los escenarios de cambio climático, que intensificarán sequías y temperaturas en la región, la gestión del parque debe priorizar enfoques preventivos y adaptativos. Esto incluye la adopción de medidas como reforestación con especies nativas tolerantes a condiciones áridas y el desarrollo de sistemas de alerta temprana basados en tecnología satelital. Simultáneamente, es urgente abordar los conflictos socioambientales derivados de la superposición de usos del suelo en áreas protegidas, donde la tenencia territorial y los objetivos de conservación entran en tensión. La implementación de políticas claras, como la zonificación participativa y la aplicación estricta de instrumentos de planificación ambiental, será clave para armonizar las actividades humanas con la preservación del páramo. En última instancia, la protección del PNRC demanda una articulación multidisciplinar que vincule ciencia, política y saberes locales, asegurando la conservación de sus servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de las comunidades que dependen de ellos.

Este estudio logró identificar y cuantificar las áreas de mayor riesgo de incendio en el Parque Natural Regional Cortadera mediante un análisis espacial integrado de amenazas climáticas, características de la vegetación y vulnerabilidad socioecológica. Sin embargo, su alcance se limita a escalas geográficas y temporales específicas (2020-2023), sin profundizar en las dinámicas sociohistóricas que perpetúan prácticas de uso del suelo insostenibles. Futuras investigaciones deberían incorporar análisis críticos del nexo poscolonial y capitalista, como señalan Sandoval et al. (2024) para América Latina, examinando cómo la tenencia de la tierra, las políticas extractivistas y la marginalización de comunidades campesinas reproducen condiciones de riesgo. Esto abriría líneas innovadoras que vinculen la ecología del fuego con estudios de justicia ambiental, permitiendo diseñar estrategias de gestión que confronten no solo síntomas, sino las causas estructurales de los incendios.

Además, mientras el modelo desarrollado ofrece herramientas técnicas para la prevención, su enfoque cuantitativo no captura plenamente los saberes locales sobre manejo ancestral del paisaje, clave para la resiliencia comunitaria. Como propone el marco de "re-imaginación radical

de desastres", futuros trabajos deben priorizar metodologías participativas que incluyan a actores locales en la co-creación de sistemas de alerta temprana y planes de restauración. Ampliar escalas temporales, por ejemplo, series históricas de 50 años y escalas espaciales mayores como corredores paramunos transfronterizos, permitiría evaluar sinergias entre cambio climático y cambios de uso del suelo a nivel regional. Estas aproximaciones, articuladas con redes de investigación latinoamericanas sobre reducción de riesgos decolonial, transformarían los incendios de meras "emergencias" en oportunidades para replantear modelos de desarrollo, integrando conservación ecológica con equidad social en territorios altoandinos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial a los campesinos habitantes del Parque Natural Regional Cortadera y a su organización Asocortadera, por el apoyo e información brindados durante el desarrollo de esta investigación. Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación MinCiencias, quien a través de su convocatoria Ideas para el Cambio Climático, financió el proyecto "Acciones para la mitigación de incendios forestales en el distrito de riego del Alto Chicamocha basadas en una iniciativa comunitaria de CTel en el marco de adaptación al cambio climático", así como a la Fundación universitaria Juan de Castellanos por el soporte administrativo que hizo posible este manuscrito.

REFERENCIAS

- Amaya-Villabona, D., & Armenteras, D. (2012). Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá D.C. (Colombia), entre 2001 y 2010. *Acta Biológica Colombiana*. 17, 143-158.
- Anselm, N., Brokamp, G., & Schütt, B. (2018). Assessment of Land Cover Change in Peri-Urban High Andean Environments South of Bogotá, Colombia. *Land*. 7(2), 75. <http://doi.org/10.3390/land7020075>
- Anzoátegui, L. V., Gil-Leguizamón, P., & Sanabria-Marin, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en Páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá, Colombia). *Bosque*. 44(1), 159-170. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100159>
- Ballester, A., Arias, A., Cobián, B., López Calvo, E., & Vieitez, E. (2011). Estudio de potenciales alelopáticos originados por *Eucalyptus globulus* Labill., *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus radiata* D.Don. *Pastos*. 12(2), 239 - 254.
- Borrelli, P., Armenteras, D., Panagos, P., Modugno, S., & Schütt, B. (2015). The Implications of Fire Management in the Andean Paramo: A Preliminary Assessment Using Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing*. 11061-11082. <http://doi.org/10.3390/rs70911061>
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth-Science Reviews*. 79, 53-72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Franco, C., Betancourth, J. C., Olaya, E., Posada, E., & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/6bad5833-4a92-4489-9243-abd945a3f76c>
- Caracol Radio. (2020, 22 de febrero). *Incendio destruyó aproximadamente 1.000 hectáreas de páramo en Boyacá*. https://caracol.com.co/emisora/2020/02/22/tunja/1582399576_611705.html
- Cárdenas, C. (2013). *El fuego y el pastoreo en el páramo húmedo de Chingaza (Colombia): efectos de la perturbación y respuestas de la vegetación* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2013/hdl_10803_120219/cacide1.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2024, 26 de enero). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv-2018/>
- Diazgranados, M., Tovar, C., Etherington, T.R., Rodríguez-Zorro, P.A., Castellanos-Castro, C., Galvis Rueda, M., & Flantua, S.G.A. (2021). Ecosystem services show variable responses to future climate conditions in the Colombian páramos. *PeerJ*. 9:e11370. <https://doi.org/10.7717/peerj.11370>
- Federación Nacional de Industriales de Madera. (2024). *Comunicado "Pinos, eucaliptos e incendios forestales: verdades y mitos"*. <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2024/02/Documento-tecnico-comunicado-pinos-eucaliptos-e-incendio-forestales.pdf>

- Granda Armijos, A. L. (2024). *Caracterización de la carga de combustible forestal muerto de las plantaciones forestales de Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham. y Eucalyptus saligna Sm en el Parque Universitario Francisco Vivar Castro*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/29050/1/AndersonLeandro_GrandaArmijos.pdf
- Harden, C.P. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*. 79, 249 - 263.
- Horn S.P. (1989). Prehistoric fires in the Chirripó highlands of Costa Rica: sedimentary charcoal evidence. *Revista de Biología Tropical*. 37, 139 -148.
- Horn, S.P., & Kappelle, M. (2009). Fire in the páramo ecosystems of Central and South America en Cochrane (Ed.) *Tropical Fire Ecology* (pp. 505 - 539). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_18
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024, 18 de enero). *Catálogo de mapas*. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal escala 1:100.000*. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/zonificacion-del-riesgo-a-incendios>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024, 5 de febrero). *Geoportal - Datos abiertos agrología*. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- Manciu, A., Rammig, A., Krause, A., & Quesada, B. R. (2022). Impacts of land cover changes and global warming on climate in Colombia during ENSO events. *Climate Dynamics*. 61, 111 - 129. <http://doi.org/10.1007/s00382-022-06545-1>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/32546/PNGIBSE_espanol_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Morales M., J. Otero, T. Van der Hammen, A. Torres, C. Cadena, C. Pedraza, N. Rodríguez, & Parra Lara, A. C. (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia. Tomo I*. PNUMA – Universidad Autónoma de Occidente – Red Colombiana de Formación. <https://gfmco.online/wp-content/uploads/Incendios-de-la-Cobertura-Vegetal-en-Colombia-Tomo-I-2011.pdf>
- Páramo, G.E. (2007). Análisis, Diagnóstico y Elaboración del mapa de susceptibilidad a los incendios de la Cobertura Vegetal en Colombia. Reporte final del contrato de consultoría 2062372 en el marco del convenio Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE). 177 p.
- Peters, T., Diertl, K.-H., Gawlik, J., Rankl, M., & Richter, M. (2010). Vascular Plant Diversity in Natural and Anthropogenic Ecosystems in the Andes of Southern Ecuador. *Mountain Research and Development*. 30 (4), 344 - 352. <http://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-10-00029.1>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Catena*. 45, 185 - 207.
- Ramos-Franco, A., Alba-Vargas, I., Cabrera-Ruiz, L. & Díaz-Rojas, C. (2021). ¿Ganadería o conservación? Caracterización del conflicto ambiental en la Reserva Forestal Protectora “El Malmo” (Tunja-Boyacá). *Mutis*. 11(1), 37-47. <https://doi.org/10.21789/22561498.1638>
- Ramsay, P.M. (2014). Giant rosette plant morphology as an indicator of recent fire history in Andean páramo grasslands. *Ecological Indicators*, 45, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.003>
- Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (2024, 30 de abril). *Cortadera*. <https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-protegida/1037>
- Rojas Hernandez, L. T. (2020, 14 de julio). ¿Por qué el 2020 ha sido el peor año para los páramos de Boyacá? *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/por-que-el-2020-ha-sido-el-peor-ano-para-los-paramos-de-boyaca-517654>

- Sandoval, V., González-Muzzio, C., & Castro, C.P. (2024). El poder de una re-imaginación radical de los desastres: nexo poscolonial y capitalista en Chile y América Latina (e ideas para un futuro justo y equitativo). *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. 8(2), 241-250. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i2.170>
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model (General Technical Report RMRS-GTR-153). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- Suarez, E., Chimbolema, S., Jaramillo, R., Zurita-Arthos, L., Arellano, P., Chimner, R. A., Stanovick, J. S., & Lilleskov, E. A. (2022). Challenges and opportunities for restoration of high-elevation Andean peatlands in Ecuador. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 27 (30). <http://doi.org/10.1007/s11027-022-10006-9>
- Xelhuantzi Carmona, J., Flores Garnica, J., & Chávez Durán, A. (2011). Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2(3), 37-52.
- Young, K. R. (2009). Andean Land Use And Biodiversity: Humanized Landscapes In A Time Of Change. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 96 (3), 492-507. <http://doi.org/10.3417/2008035>
- Zubieta, R., Prudencio, F., Ccanchi, Y., Saavedra, M., Sulca, J., Reupo, J., & Alarco, G. (2021). Potential conditions for fire occurrence in vegetation in the Peruvian Andes. *International Journal of Wildland Fire*. 30(11), 836-849. <http://doi.org/10.1071/wf21029>