

Evaluación de la vulnerabilidad del complejo de páramos Pisba (Boyacá) frente al uso del suelo usando SIG y AHP

Juan Camilo Ramírez Gómez 

Nelly Rodríguez Eraso 

Resumen

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso complejo que combina factores biofísicos, sociales y económicos. Su estudio es esencial para la toma de decisiones en el marco de la gestión ambiental y la conservación de los ecosistemas. El propósito de este estudio se enfocó en proponer y desarrollar una metodología para evaluar la vulnerabilidad de la cobertura vegetal del complejo de páramos Pisba (Departamento de Boyacá). Mediante técnicas de análisis espacial y un enfoque de jerarquía analítica (AHP) a partir de la consulta de expertos, se calculó el índice de vulnerabilidad. Se identificaron 25 variables agrupadas en 11 factores que reflejan la sensibilidad, exposición y resiliencia del ecosistema. 18,06 % del área presenta vulnerabilidad alta y 59,98 % vulnerabilidad baja. Los factores con mayor incidencia fueron el estado de la vegetación, las condiciones abióticas y la conectividad. Las zonas más vulnerables correspondieron a coberturas de pastos y cultivos sobre el borde del páramo y, a nivel de coberturas naturales, los bosques andinos. El estudio brinda una metodología sistemática para la cuantificación y caracterización de la vulnerabilidad con el objetivo de facilitar su replicabilidad en otros complejos de páramos del país, para su mejor gestión y conservación.

Palabras clave: análisis espacial, análisis multicriterio, cobertura del suelo, páramo de Pisba, vulnerabilidad ambiental.

Ideas destacadas: artículo enfocado en evaluar la vulnerabilidad de ecosistemas de páramo en Colombia, asociada con cobertura del suelo. Integración de componentes de sensibilidad, exposición y resiliencia usando análisis espacial y jerarquía analítica (AHP). Identificación de los bosques andinos como las coberturas más vulnerables, junto con los bordes de los páramos.



RECIBIDO: 01 DE AGOSTO DE 2022. | EVALUADO: 06 DE ENERO DE 2023. | ACEPTADO: 09 DE DICIEMBRE DE 2023.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Ramírez Gómez, Juan Camilo; Rodríguez Erazo, Nelly. 2024. "Evaluación de la vulnerabilidad del complejo de páramos Pisba (Boyacá) frente al uso del suelo usando SIG y AHP". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 33 (2): 347-368. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n2.104501>.

✉ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá – Colombia. ☰ juaramirezg@unal.edu.co – ORCID: 0000-0002-6762-549X.

✉ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá – Colombia. ☰ nrodrigueze@unal.edu.co – ORCID: 0000-0001-7616-2493.

✉ Correspondencia: Nelly Rodríguez-Erazo. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

Evaluation of the Vulnerability of the Pisba Moorland Complex (Boyacá) Against Land Use Using GIS and AHP

Abstract

Vulnerability assessment is a complex process that combines biophysical, social and economic factors. Its study is essential for decision-making in the framework of environmental management and ecosystem conservation. The purpose of this study focused on proposing and developing a methodology to assess the vulnerability of the vegetation cover of the Pisba moorland complex (Department of Boyacá). Using spatial analysis techniques and an Analytical Hierarchy Approach (AHP) based on expert consultation, the vulnerability index was calculated. 25 variables grouped into 11 factors that reflect the sensitivity, exposure and resilience of the ecosystem were identified. 18.06 % of the area presents high vulnerability and 59.98 % low vulnerability. The factors with the highest incidence were state of the vegetation, abiotic conditions and connectivity. The most vulnerable areas corresponded to pasture and crop cover on the edge of the moorland and the level of natural cover, the Andean forests. The study provides a systematic methodology for the quantification and characterization of vulnerability in order to facilitate its replicability in other moorland complexes in the country, for better management and conservation.

Keywords: spatial analysis, multi-criteria decision analysis, land cover, paramo de Pisba, environmental vulnerability.

Highlights: article focused on assessing the vulnerability of paramos ecosystems in Colombia, associated with land cover. Integration of sensitivity, exposure, and resilience components using spatial analysis and an Analytical Hierarchy Approach (AHP). Identification of the Andean forests as the most vulnerable covers, along with the edges of the paramos.

Avaliação da vulnerabilidade do complexo de charnecas de Pisba (Boyacá) ao uso da terra usando GIS e AHP

Resumo

A avaliação da vulnerabilidade é um processo complexo que combina fatores biofísicos, sociais e econômicos. Seu estudo é essencial para a tomada de decisões no âmbito da gestão ambiental e conservação dos ecossistemas. O objetivo deste estudo se concentrou em propor e desenvolver uma metodologia para avaliar a vulnerabilidade da cobertura vegetal do complexo pâramos Pisba (Departamento de Boyacá). Utilizando técnicas de análise espacial e uma Abordagem Hierárquica Analítica (AHP) baseada em consulta a especialistas, o índice de vulnerabilidade foi calculado. Foram identificadas 25 variáveis agrupadas em 11 fatores que refletem a sensibilidade, exposição e resiliência do ecossistema. 18,06 % da área apresenta alta vulnerabilidade e 59,98 % baixa vulnerabilidade. Os fatores com maior incidência foram estado da vegetação, condições abióticas e conectividade. As áreas mais vulneráveis correspondiam a pastagens e cobertura agrícola na borda do páramo e, em nível de cobertura natural, as florestas andinas. O estudo fornece uma metodologia sistemática para a quantificação e caracterização da vulnerabilidade de forma a facilitar a sua replicabilidade em outros complexos de charnecas do país, para uma melhor gestão e conservação.

Palavras-chave: análise espacial, análise multicritério, cobertura do solo, pâramos de Pisba, vulnerabilidade ambiental.

Ideias destacadas: artigo focado na avaliação da vulnerabilidade dos ecossistemas páramo na Colômbia, associada à cobertura da terra. Integração de componentes de sensibilidade, exposição e resiliência usando análise espacial e uma Abordagem de Hierarquia Analítica (AHP). Identificação das florestas andinas como as coberturas mais vulneráveis, junto com as bordas dos pâramos.

Introducción

Como resultado del cambio global, la vulnerabilidad ambiental incide sobre el funcionamiento de los sistemas biofísicos y socioeconómico (Adger 2006; Liao, Li y Hou 2013; Nguyen y Liou 2019). Su estudio ha sido discutido en la gestión de riesgos y desastres naturales (De Lange et ál. 2010; Yang et ál. 2015), desarrollo sostenible (Turner et ál. 2003), crecimiento urbano (Hong et ál. 2016) y cambio climático (Cinner et ál. 2013), facilitando la gestión, conservación y restauración de los ecosistemas (Nguyen y Liou 2019), así como el diseño de planes de desarrollo dentro de un marco de protección ambiental sostenible (Zhao et ál. 2018).

La vulnerabilidad ambiental se define como la capacidad de los ecosistemas para absorber cambios asociados a sus variables de estado y presión (He, Shen y Zhang 2018), o el grado de daño que un ecosistema experimenta debido a una presión o estrés específico (Turner et ál. 2003; Adger 2006). En los últimos años, su estudio se ha aplicado a problemas y lugares específicos (Senisterra, Gaspari y Delgado 2015), cuantificándose generalmente a través de tres componentes: (i) sensibilidad, compuesta por características propias del ecosistema que tienen potencial de ser afectadas por una presión determinada, (ii) exposición, relacionada con posibles disturbios, así como las características propias del entorno que pueden generar un impacto directo al ecosistema, y (iii) resiliencia como indicador de la capacidad del ecosistema para responder al cambio, así como las acciones que se toman para su conservación (Omann, Stocker y Jäger 2009; Liao, Li y Hou 2013; Malekmohammadi y Jahanishakib 2017). Existen diferentes métodos para la identificación y cálculo de la vulnerabilidad, siendo el componente espacial una base esencial para su análisis (Liu et ál. 2020). Los métodos incluyen jerarquía analítica difusa, donde, a partir de un conjunto de factores, se evalúa su influencia en los componentes ambientales mediante cálculos matemáticos (Rezaei, Safavi y Ahmadi 2013); métodos con enfoques de minería de datos que incluyen técnicas de redes neuronales artificiales (ANN) (Kia et ál. 2012); método de evaluación del paisaje por medio de indicadores (Kangas et ál. 2000; Salvati et ál. 2013); método del proceso de jerarquía analítica (AHP) donde se ponderan las variables que puedan incidir en la vulnerabilidad (Song et ál. 2010; Huang, Tsai y Lin 2010); y método de análisis de componentes principales (Khan 2012). Así mismo, existen modelos que utilizan combinaciones de los métodos anteriormente planteados.

Los factores más usados para evaluar la vulnerabilidad incluyen variables relacionadas con la cobertura y uso del suelo, datos agropecuarios e indicadores de estructura paisajística (Li et ál. 2006; Song et ál. 2010; Xiaolei et ál. 2011; Hong et ál. 2016; Choudhary, Boori y Kupriyanov 2018), así como factores de accesibilidad y población (De Lange et ál. 2010). Pei et ál. (2015) afirman que no existen criterios estandarizados para elegir los factores, dado que cada sistema, de acuerdo con sus características y dinámicas, debe contemplar factores indicativos, operativos y representativos. Adicionalmente, las metodologías propuestas para un determinado ecosistema no pueden replicarse fácilmente, dado que tanto factores como pesos de incidencia son específicos del contexto del estudio y del ecosistema (De Lange et ál. 2010).

A nivel de Colombia, los estudios de vulnerabilidad se han enfocado en análisis de gestión del riesgo, tales como inundación, eventos torrenciales y fenómenos de remoción en masa (Rodríguez et ál. 2017), análisis de vulnerabilidad social y económica (Durán Gil 2017), e impacto del cambio climático sobre diferentes ecosistemas estratégicos (CAR-UNAL 2018). Particularmente para los ecosistemas de páramos, los estudios indican que están siendo afectados debido al cambio climático, la sobreexplotación y el uso del suelo, con pérdida de servicios ecosistémicos (entre 10 % a 40 %) bajo condiciones climáticas futuras (Díazgranados et ál. 2021). Gutiérrez Rey (2002) identificó que entre el 90 % y el 100 % de los páramos podrían verse afectados por desplazamiento altitudinal y cambios biogeográficos. Echeverría, Rosero y Bravo (2018) indicaron un aumento en la presencia de sequías y Valencia et ál. (2020) encontraron que gran parte de las poblaciones de *Espeletia* pueden desplazarse hacia partes más altas donde eventualmente no hay espacio para desarrollarse. En el tema hídrico, Cárdenas Agudelo (2016) indicó que las actividades antrópicas evidencian la pérdida de algunas de sus características hidrológicas del páramo, haciéndolos más vulnerables.

Pese a estos estudios, existen vacíos relacionados con cambios en la cobertura y uso del suelo, los cuales representan la mayor problemática para el ecosistema de páramos (Vargas Ríos 2013; Obando Almeida 2019). Bajo este contexto, contar con metodologías cuantitativas e indicadores que utilicen un conjunto de datos espaciales acordes con las características del ecosistema y su entorno es importante. La presente investigación, se enfocó en (i) desarrollar una metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental que integre los componentes de sensibilidad, exposición y resiliencia a partir de métodos

de análisis espacial y multicriterio y (ii) analizar patrones espaciales de la vulnerabilidad ambiental asociados a la cobertura vegetal en el complejo de páramo Pisba en Boyacá - Colombia para determinar las zonas prioritarias de gestión. Se combinaron técnicas de análisis espacial como percepción remota, geoestadística, lógica difusa y análisis multicriterio AHP, para obtener la zonificación de la vulnerabilidad por medio de la identificación de *hotspots* y *coldspots*. Se espera que el uso de técnicas espaciales y la identificación de factores de vulnerabilidad brinden una base metodológica que pueda replicarse a los ecosistemas paramunos del país, buscando mejorar el marco de la gestión, la priorización de esquemas de manejo y conservación de este importante ecosistema.

Metodología

Área de estudio

Los ecosistemas de páramo son considerados islas biogeográficas que evolucionaron en aislamiento, siendo frágiles frente a las presiones antrópicas, dado que no desarrollaron adaptaciones a diferentes disturbios (Vargas Ríos 2013; Cárdenas Agudelo 2016). Pese a que en Colombia existen leyes que regulan este ecosistema dada su importancia social y ambiental, en los últimos años se han incrementado los índices de ocupación y transformación, principalmente por actividades económicas como la agricultura, ganadería y minería (Rivera y Rodríguez 2011).

Este estudio se realizó en el complejo de páramos Pisba, localizado sobre la cordillera Oriental colombiana, en los departamentos de Boyacá y Casanare, y cuya extensión es de 81.482 ha, de las cuales el 26 % están dentro del Parque Nacional Natural (PNN) Pisba (Morales et ál. 2007). La zona se ubica entre los 3.100 y los 4.100 m.s.n.m. y se caracteriza por ser un páramo de húmedo a muy húmedo, con valores mensuales de 94 % de humedad relativa y temperaturas medias entre los 5,2 °C y los 6,5 °C. El relieve es complejo, conformado por laderas suaves y escarpadas, lomas, colinas crestas y crestones, y suelos con alto contenido de materia orgánica. La vegetación está compuesta por diferentes especies de frailejón (*Espeletia* spp), pajonales de los géneros *Festuca* y *Calamagrostis*, chuscales (*Chusquea tessellata*), romerales (*Linochilus rosmarinifolius*) y gran cantidad de briofitos (Morales et ál. 2007). El 71,7 % de coberturas está compuesto por vegetación de páramo, 11,34 % por bosques andinos y cerca del 16 % por pastos y cultivos (Ramírez Gómez 2022) (Figura 1).

Además de ser importante ambientalmente, el complejo de Pisba abastece de agua a cerca de 130.000 personas. Entre las actividades económicas se destaca la siembra de papa y habas, así como la ganadería extensiva, las cuales han impactado de manera directa la cobertura vegetal, generando recurrentes incendios con el fin de renovar zonas de pajonales para la ganadería extensiva y ocasionando la transformación aproximada del 48 % del ecosistema (Meneses et ál. 2006; Morales et ál. 2007; Osorio Fernández 2015). En los últimos veinte años se ha incrementado la actividad minera, siendo el segundo páramo con más títulos mineros otorgados en el país (Osorio Fernández 2015).

Metodología

La metodología se basó en las propuestas de Turner et ál. (2003) y De Lange et ál. (2010), dentro del marco de las ciencias de la sostenibilidad, junto con métodos de análisis espacial y análisis de decisión multicriterio. La Figura 2 describe los pasos usados para evaluar la vulnerabilidad ambiental del ecosistema de páramos frente a la cobertura del suelo.

Selección y descripción de factores y variables

A partir de revisión bibliográfica y consulta con expertos que trabajan sobre vulnerabilidad ambiental y páramos, se seleccionaron nueve factores relacionados con el tema, los cuales se estructuraron en veinticinco variables biofísicas, sociales y económicas, que reflejan su incidencia sobre la cobertura vegetal (Anexo 1). Se tuvo en cuenta la disponibilidad y calidad de información y su posibilidad de espacialización para efectos de análisis, usando ArcGIS versión 10.6 (ESRI 2022) y como insumo básico el mapa de cobertura del suelo del año 2020 (Ramírez Gómez 2022).

Los factores de sensibilidad tuvieron en cuenta el estado de la vegetación, la estructura del paisaje y las condiciones abióticas del ecosistema; la exposición se evaluó mediante cinco factores que reflejaron los posibles disturbios, así como las características propias del entorno del ecosistema que pueden generar un impacto directo (Bourgoin et ál. 2020). Los factores de resiliencia representaron las zonas de protección, donde se mantienen los flujos y procesos ecológicos, así como la integridad, evaluada mediante la conectividad de la cobertura natural como una medida de continuidad de los procesos ecológicos asociados al páramo y el índice de vegetación para establecer la capacidad de recuperación del ecosistema, considerando lo planteado por (Yi y Jackson 2021).

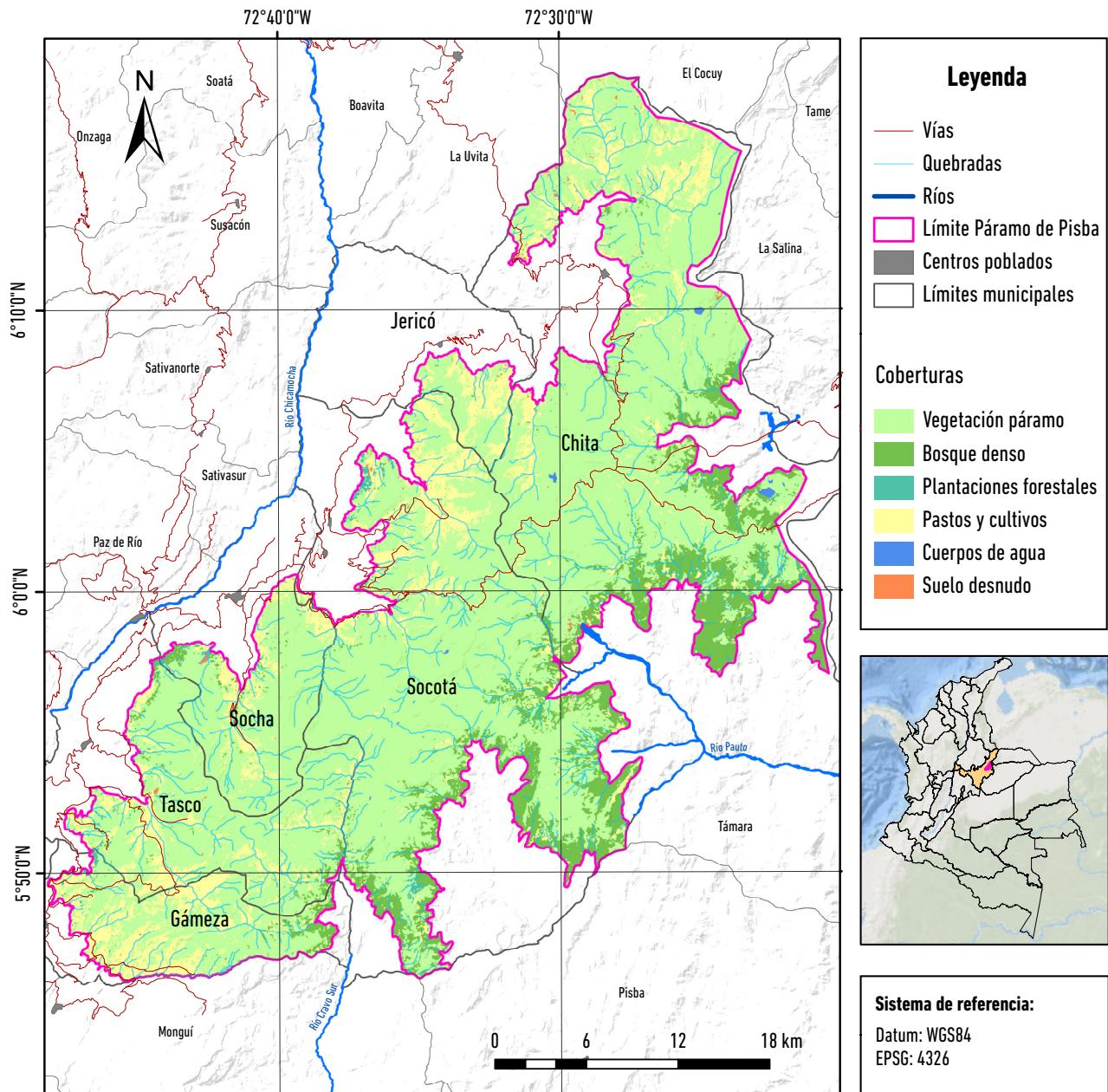


Figura 1. Coberturas del suelo para el Complejo de Páramo Pisba, 2020.

Datos: cartografía base IGAC (2020). Imágenes de satélite Landsat 8, 2020 (Colección USGS, Tier 1 TOA Reflectance) y uso de Random Forest.

Normalización de atributos de vulnerabilidad ecológica

Las variables consideradas en el estudio, se estandarizaron usando un índice de 0 a 1, aplicando dos técnicas principales: (i) para las capas de información de datos continuos (veintidós variables), se usó lógica difusa utilizando el software TerrSet (Zadeh 1965), y, a partir del método Signomial, se identificaron valores de cortes iniciales y finales, estableciendo si eran crecientes o descendientes; (ii) las restantes tres variables que corresponden a datos categóricos, se clasificaron de 0 a 1, asignando

un valor de 0 y 1 para categorías con menor y mayor sensibilidad, exposición o resiliencia, respectivamente. Todas las variables fueron espacializadas y rasterizadas a un tamaño de pixel de 30 m x 30 m, que corresponden a una escala 1:25.000, mediante el uso de ArcGIS versión 10.6 (ESRI 2022). Debido a que las variables y factores se encuentran en superficies continuas los resultados se agruparon en tres rangos: valores bajos (0-0,33), valores medios (0,34-0,66) y valores altos (0,67-1) para su espacialización y aporte en área.

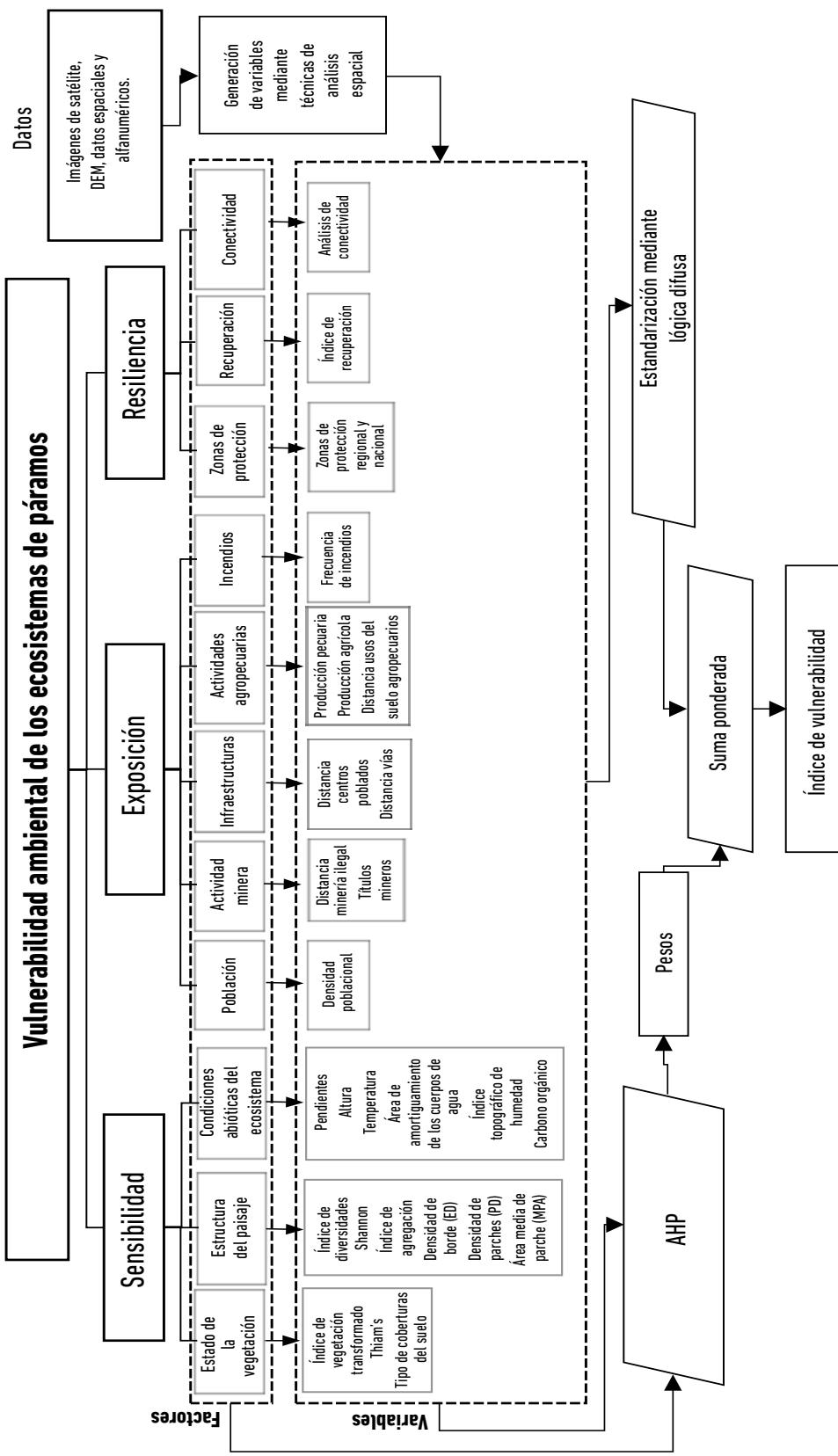


Figura 2. Esquema metodológico propuesto para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo.
Datos: adaptado de He, Shen y Zhang (2018).

Determinación de pesos mediante análisis multicriterio

La integración de los factores de la vulnerabilidad se realizó mediante un modelo multicriterio jerarquía analítica (AHP), el cual identifica el grado de incidencia de cada factor y variable dentro del modelo de la vulnerabilidad (Huang, Tsai y Lin 2010; Pei et ál. 2015) construido mediante la consulta a ocho expertos en diferentes temáticas asociadas a los ecosistemas de páramo. Se establecieron tres niveles de jerarquía; componentes (sensibilidad, exposición y resiliencia), factores y, por último, las variables (Figura 2). Se planteó un análisis de *Pairwise comparison*, para cinco factores (estado de la vegetación, estructura del paisaje, condiciones abióticas, infraestructuras y actividades agropecuarias), mientras que para los restantes cuatro factores (población, minería, zonas de protección regional y zonas de protección nacional), los cuales tenían menos de tres variables, la comparación por pares se hizo según lo establecido por Saaty (1977). Cada experto asignó un índice de importancia de acuerdo a una escala de valoración establecida por Saaty (1997) e implementado en el software TerrSet (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz y escala de comparación del análisis multicriterio

Factor o Variable	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	1	-	-	-	-
A ₂	5	1	-	-	-
A ₃	1/7	1/3	1	-	-
A ₄	1/5	3	5	1	-
A ₅	3	1/5	7	5	1

Datos: con base en Saaty (1997).

Nota: escalas de comparación: menos importante (valores de 1/9 a 1/3), igual (valor de 1) y más importante (valores de 3 a 9).

La consistencia de cada matriz se evaluó usando los índices propuestos por Saaty (1997): (i) Índice de consistencia (IC), el cual determina el grado de consistencia de los juicios empleados por los expertos; (ii) Índice aleatorio de consistencia I (IA), corresponde al valor medio del índice de consistencia, cuyo valor depende del tamaño de la matriz (n); y (iii) Índice aleatorio de consistencia II, indica la relación que existe entre el índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio de consistencia (IA).

Cálculo y espacialización del índice de vulnerabilidad

La generación del índice de la vulnerabilidad se basó en la ecuación de Turner et ál. (2003), donde los valores más bajos son zonas con menor vulnerabilidad y los valores más altos zonas que presentan mayor vulnerabilidad.

$$\text{Indice de vulnerabilidad} = \text{Sensibilidad} + \text{Exposición} - \text{Resiliencia}$$

La distribución espacial del índice de vulnerabilidad se verificó por medio de la herramienta *High/Low Clustering* (*Getis-Ord General G*), y se procedió a mapear los clústeres, mediante la herramienta *Hotspot Analysis* (*Getis-Ord Gi**) (*Spatial Statistics*) de ArcGIS 10.6, la cual determina la agrupación espacial de los valores altos y bajos, mediante el método *Getis-Ord Gi** (Getis y Ord 1992), el cual está determinado por:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \right) \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\left(\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \right)^2} \right) \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}{n-1}}}$$

Donde w_i y w_j son los valores de atributos para cada pixel del índice de vulnerabilidad i y j , y $w_{i,j}$ es el peso espacial para las cada i y j . n es el número de pixel a analizar.

A partir del análisis anterior que generó un índice de correlación espacial por pixel, se delimitaron las zonas de vulnerabilidad, tomando como categoría alta los *hotspots* y la vulnerabilidad baja; los *coldspots* con un nivel de confianza superior a 95 %; y para la categoría media se tomaron las zonas de no significancia.

Resultados

Cerca del 18,06 % del complejo de páramos Pisba presentó un índice de vulnerabilidad alto (*hotspots*), cuya distribución se asoció a coberturas de pastos y cultivos y el borde de la región occidental del páramo (municipios de Gámeza, Tasco, Socha, Socotá, Chita y Jericó). Los *coldspot*, categorizados como vulnerabilidad baja ocuparon el 59,98 % del área y se ubicaron en la zona central del complejo y en el PNN Pisba.

Comportamiento e importancia de factores y variables

La evaluación de las matrices multicriterio arrojó un IC menor al 0,1 y un IA de 0,58 para las matrices de tres variables, 0,9 para matrices de 4 variables y 1,12 para matrices de 5 variables. Las condiciones abióticas del ecosistema (38,1 %) y el estado de la vegetación (35,4 %) fueron los factores con mayor peso para la sensibilidad y a nivel de exposición los incendios y población fueron los factores de mayor y menor peso, respectivamente. La conectividad fue considerada la más importante (47,2 %) para la resiliencia (Tabla 2).

El 68,34 % de la zona de estudio presenta valores de sensibilidad dentro de un rango bajo (0-33 %), y solo el 11,01 % valores altos (> 0,67). Carbono orgánico, área promedio de parche, pendientes y tipo de coberturas presentaron los valores más altos, distancia a los cuerpos de agua, temperatura y altura los valores más bajos y el índice de vegetación transformado valóres intermedios (Figura 3a). Cerca del 89 % del área tuvo valóres en un

bajo rango (0-33 %) y 7,31 en rango alto (> 0,67 %) para exposición, siendo distancia a usos agropecuarios y títulos mineros las de mayor valor, y densidad poblacional la de menor valor (Figura 3b). Para resiliencia, 61 % del área de estudio tuvo valóres altos (mayor resiliencia) dado por la conectividad (87,7 %), y las zonas de protección presentaron valóres medios asociados a zonas sin protección y zonas con protección regional (Figura 3c).

Tabla 2. Pesos de las variables y factores asociados a la vulnerabilidad ambiental del Complejo del Páramos Pisba (Boyacá)

Componente	Factor	Peso (%)	Variables	Peso (%)
Sensibilidad	Estado de la vegetación	35,4	Índice de vegetación transformado Thiam's	42,9
			Tipo de cobertura	57,1
	Estructura del paisaje	26,5	Índice de diversidad de Shannon	18,2
			Índice de agregación	13,1
			Densidad de borde (BD)	14,3
			Densidad de parches (PD)	22,3
			Área promedio de parche (MPA)	32,2
	Condiciones abióticas del ecosistema	38,1	Pendientes	16,6
			Altura	14,0
			Temperatura	11,9
			Área de amortiguamiento de los cuerpos de agua	18,5
			Índice topográfico de humedad	20,5
			Carbono orgánico	18,4
Exposición	Población	8,3	Densidad poblacional	100,0
	Actividad minera	18,8	Distancia minería ilegal	58,6
			Títulos mineros	41,4
	Infraestructuras	16,0	Distancia centros poblados	45,7
			Distancia vías	54,3
	Actividades agropecuarias	25,9	Producción pecuaria	26,2
			Producción agrícola	23,4
			Distancia usos del suelo agropecuarios	50,4
Resiliencia	Incendios	31,1	Frecuencia de incendios	100,0
	Zonas de protección	25,0	Zonas de protección	100,0
	Índice de recuperación	27,9	Índice de recuperación	100,0
	Conectividad	47,2	Conectividad	100,0

Datos: a partir de matrices multicriterio calificadas por expertos.

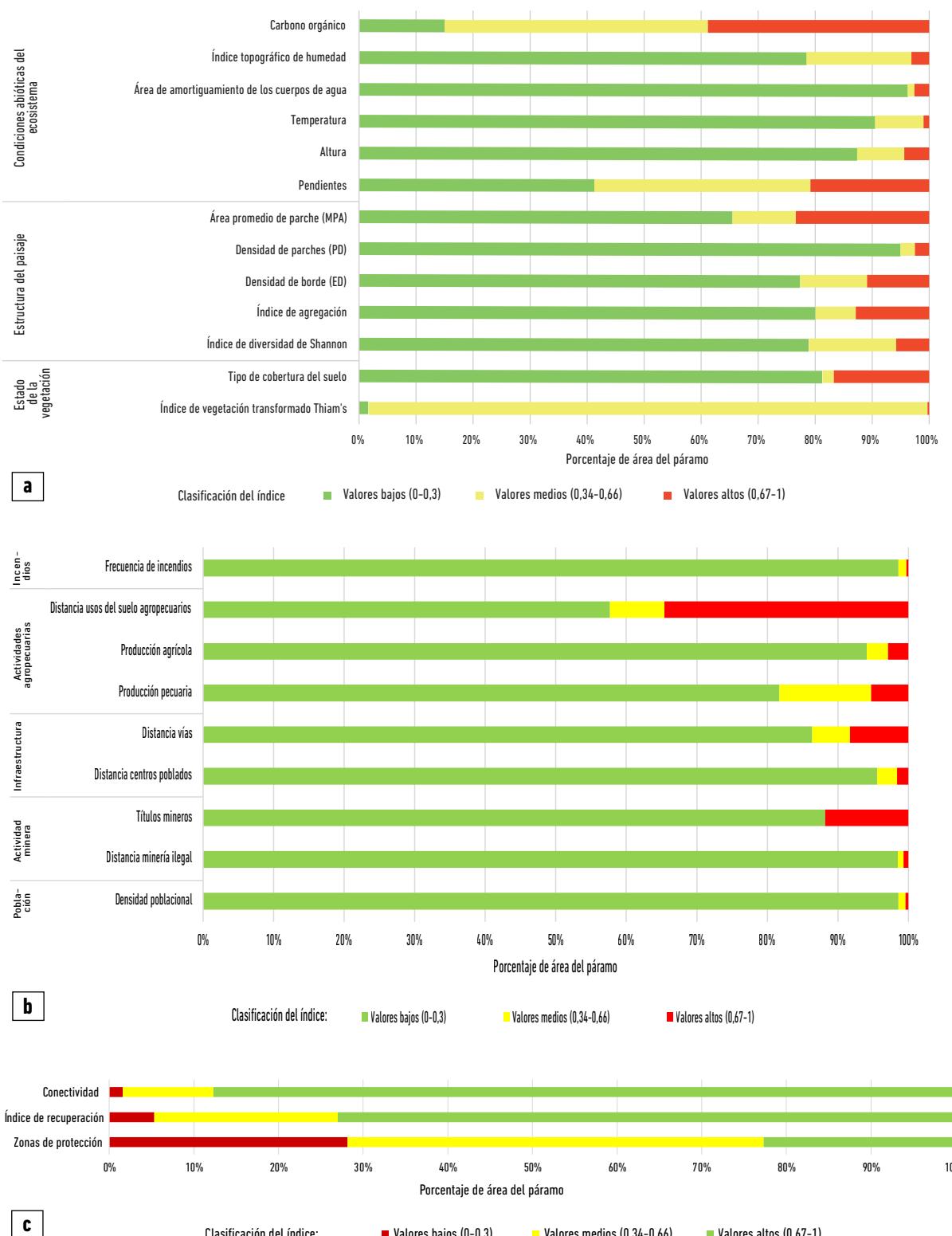


Figura 3. Grado de vulnerabilidad expresado como porcentaje del área ocupada por cada variable evaluada en el Complejo de Páramos Pisba. (a) sensibilidad, (b) exposición y (c) resiliencia.

Datos: generado a partir de la clasificación de los resultados de cada variable en tres rangos: valores bajos (0-0,33), valores medios (0,34-0,66) y valores altos (0,67-1), mediante ArcGIS 10.6.

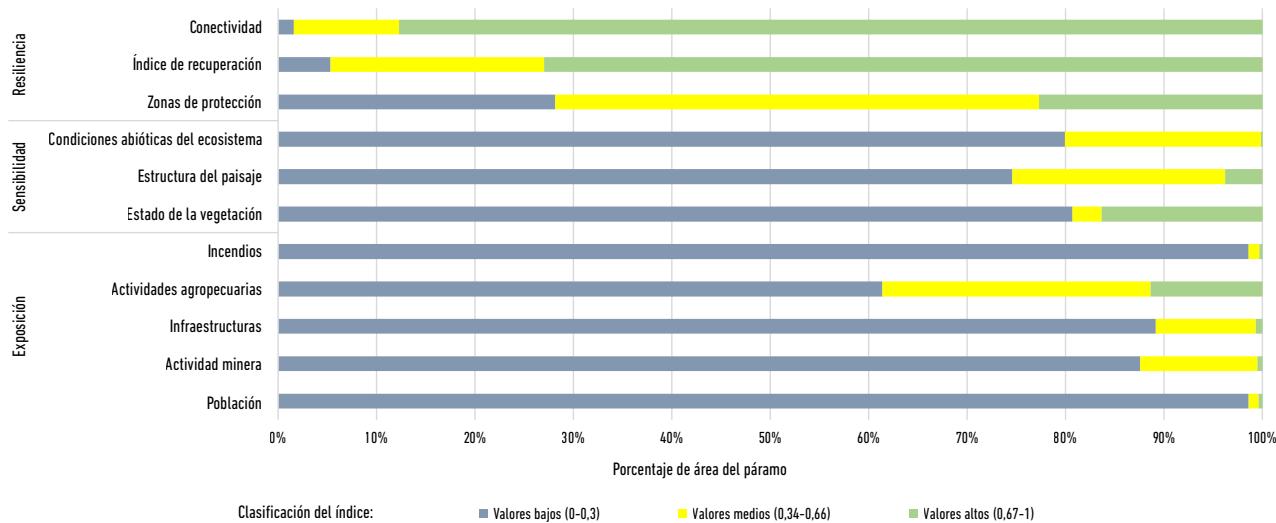


Figura 4. Porcentaje de áreas totales a nivel de factores.

Datos: generado a partir de la clasificación de los factores en tres rangos: valores bajos (0-0,33), valores medios (0,34-0,66) y valores altos (0,67-1), y el cálculo del área para cada categoría, mediante Arcgis 10.6. Los valores más altos indican una mayor resiliencia, sensibilidad y exposición.

La Figura 4, sintetiza el aporte de cada factor a la vulnerabilidad, donde espacialmente la región occidental correspondiente a los bordes de páramo mostró los mayores valores de exposición y sensibilidad. La estructura del paisaje, el índice de diversidad y las actividades agropecuarias (distancia a cultivos, producción agrícola y producción pecuaria) fueron las variables con mayor heterogeneidad espacial. Pendientes, distancia cuerpos de agua y el índice topográfico de humedad se distribuyeron de manera homogénea en todo el complejo de páramos. Respecto a la resiliencia, se observaron valores más bajos sobre la región sur, centro occidente y norte (Figuras 5a y 5b). Se destacó la zona ubicada en la región sur que corresponde al Parque Nacional Natural Pisba (Figura 5c).

Vulnerabilidad ambiental y su relación con los usos del suelo

El estado de la vegetación y la estructura del paisaje presentaron los mayores valores medios en las coberturas de pastos y cultivos y suelos desnudos, mientras que los bosques andinos tuvieron valores medios inferiores a 0,3 (Figura 6a). La exposición mostró mayor variabilidad para actividades agropecuarias en las coberturas de pastos y cultivos (media superior a 0,5) siendo baja para las coberturas naturales (media < 0,2), indicando su baja exposición frente a esta variable (Figura 6b). Finalmente, las variables de recuperación y protección mostraron los mayores valores medios sobre las coberturas naturales

(vegetación de páramo, bosque denso y cuerpos de agua) (Figura 6c). En términos de porcentajes, las coberturas naturales más afectadas, a nivel de vulnerabilidad ambiental, corresponden a los cuerpos de agua con 45,68 % del área en vulnerabilidad alta y media, seguido por los bosques con 43,41 % con vulnerabilidad alta y media y la vegetación de páramo con 28,26 % con vulnerabilidad alta y media. Por su parte, las zonas de suelo desnudo obtuvieron un 55,1 % del área en vulnerabilidad alta y un 25,25 % en vulnerabilidad media, destacando dichas zonas como altamente vulnerables.

El complejo de páramos Pisba tuvo un índice de vulnerabilidad alto (*hotspots*) sobre la región occidental, ocupando un área de 20.970 ha (18,06 %). Estas zonas están asociadas a un índice alto de sensibilidad y exposición y a coberturas principalmente de pastos y cultivos, donde se destacan variables como la presencia de títulos mineros, densidad poblacional alta, producción agrícola y pecuaria alta, áreas medias de parche bajas y carbono orgánico bajo. Las zonas de no significancia categorizadas como vulnerabilidad media ocuparon 25.491 ha (21,96 % del área) y se localizaron sobre la región suroccidental (municipio de Gámeza) y la región nororiental (municipio de Chita) en coberturas de bosques, pastos y cultivos, donde las variables más representativas fueron temperaturas medias- altas (> 12,5 °C), alturas bajas (< 2800 m.s.n.m.), carbono orgánico bajo, producción pecuaria media, presencia de incendios y falta de figuras

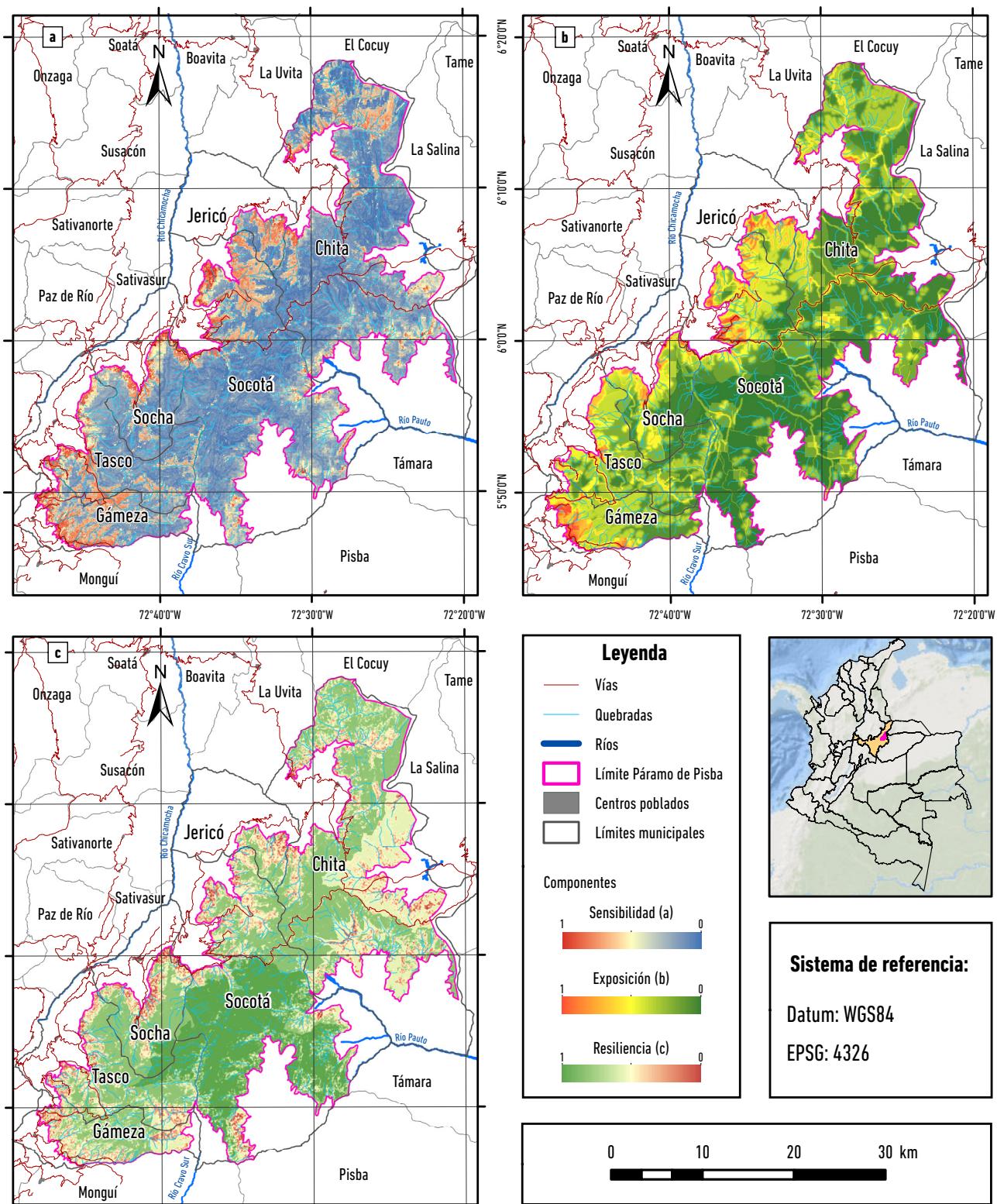


Figura 5. Índice de sensibilidad, exposición y resiliencia del Complejo de Páramos Pisba (Boyacá).
Datos: a partir de la suma ponderada de los factores a partir de los pesos establecidos en el análisis multicriterio (Tabla 2).

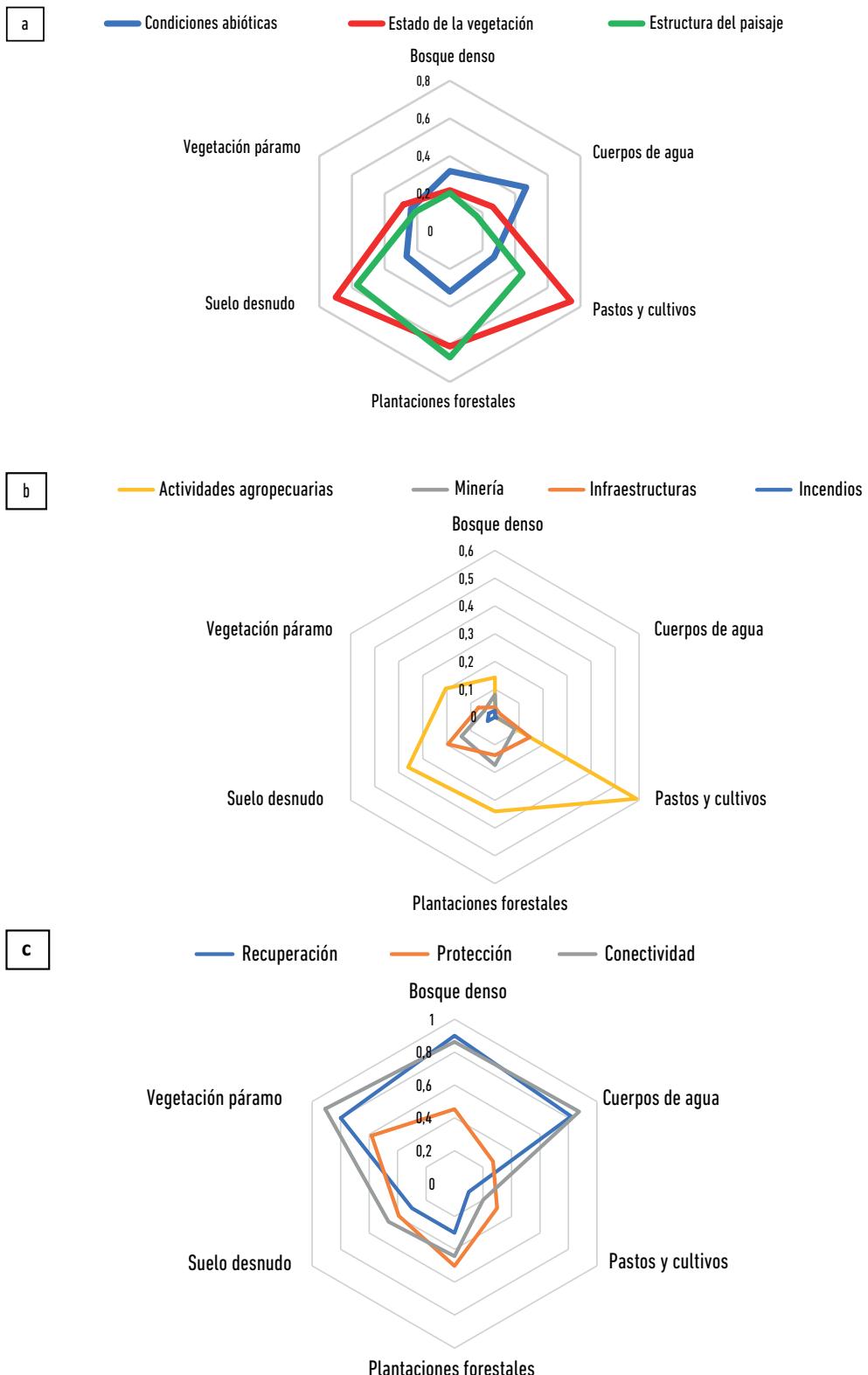


Figura 6. Valores medios de los factores de sensibilidad respecto a cada tipo de cobertura del suelo. (a) sensibilidad, (b) exposición y (c) resiliencia. Datos: generado a partir de los valores medios entre los factores y las coberturas del suelo. Las gráficas indican el valor medio de los pixeles para cada cobertura.

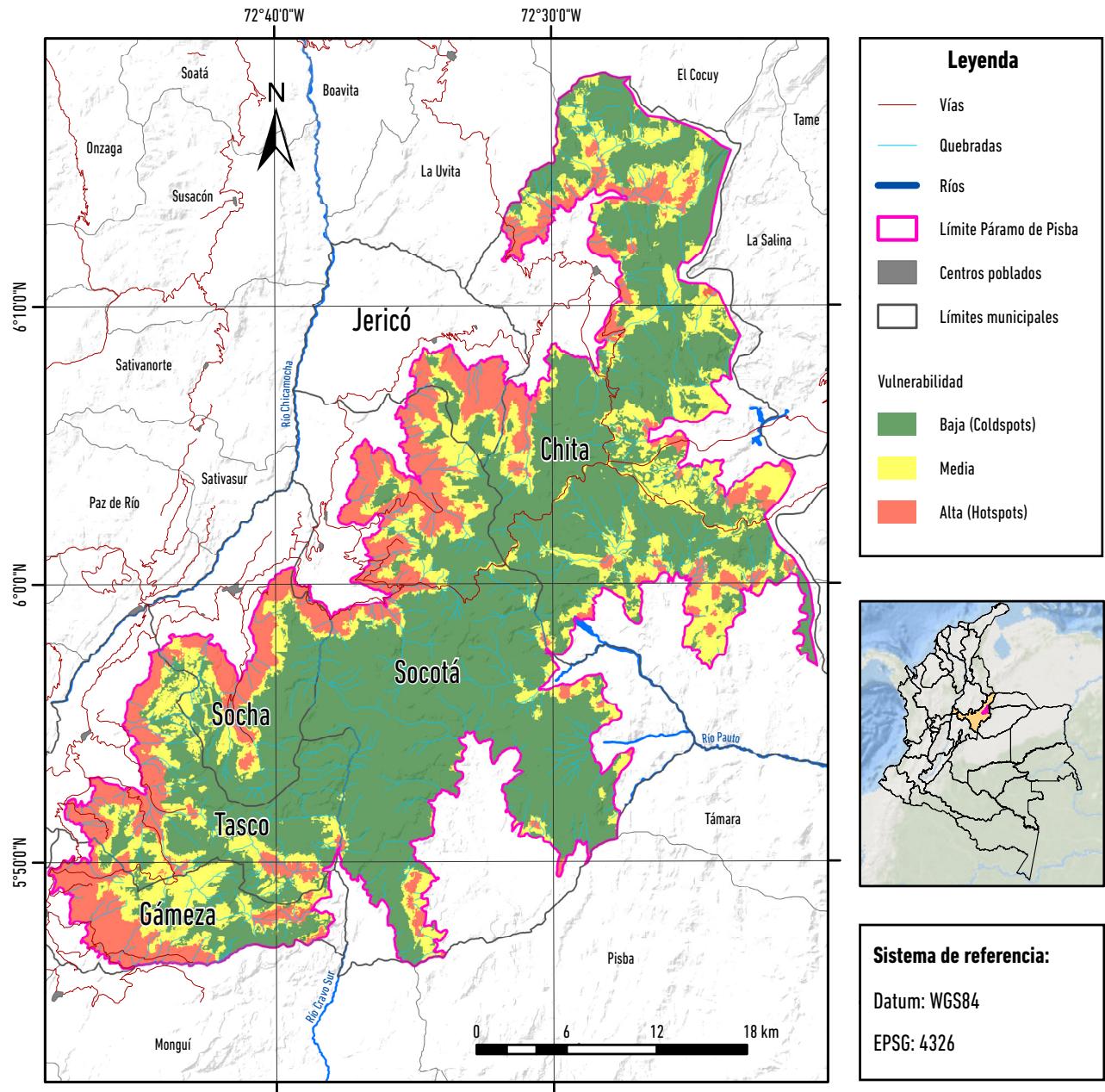


Figura 7. Zonificación de la vulnerabilidad del Complejo de Páramos Pisba (Boyacá).

Datos: a partir de la propuesta de Turner et ál. (2003) y el uso de High/Low Clustering (Getis-Ord General G) y Hotspot Analysis (Getis-Ord Gi*) (*Spatial Statistics*) de ArcGIS 10.6 (ESRI 2022).

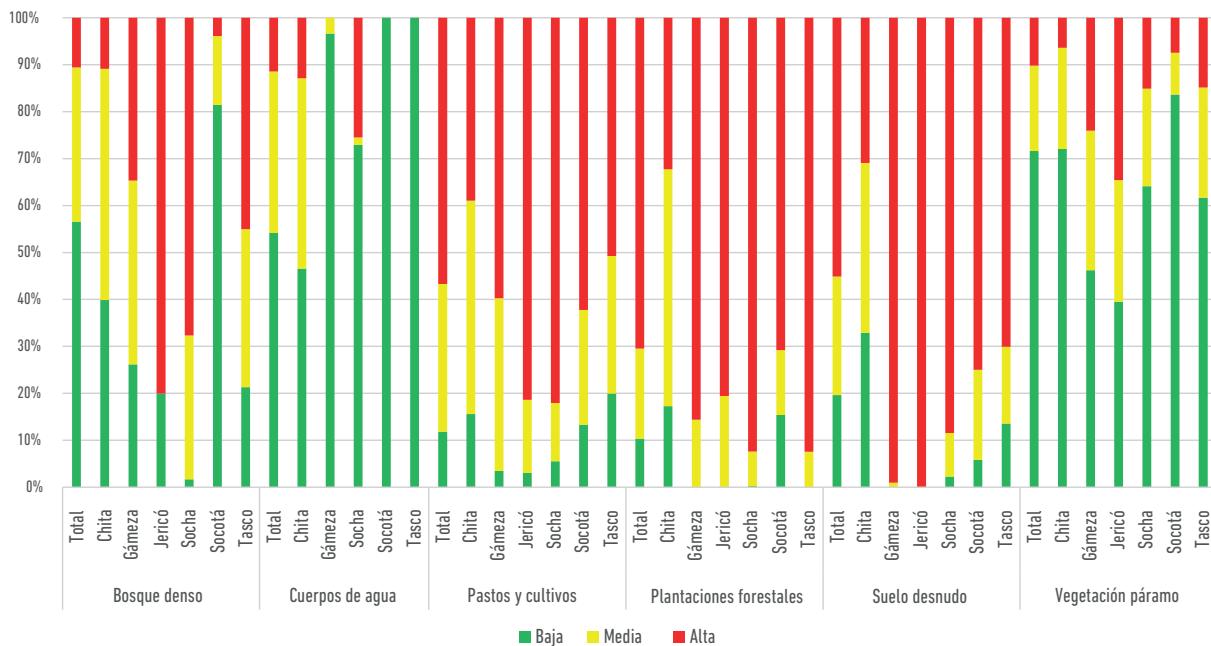


Figura 8. Porcentaje relativo de vulnerabilidad ambiental a nivel de coberturas del suelo.

Datos: a partir de análisis municipales, datos de coberturas y zonificación de la vulnerabilidad.

de protección. Finalmente, los *coldspots*, categorizados como vulnerabilidad baja, ocuparon 69.640 ha (59,98 % del área), y se distribuyeron sobre las regiones centrales de los municipios, con excepción de la región oriental del municipio de Socotá, asociado a coberturas del páramo y a la presencia del PNN Pisba (Figura 7).

Las coberturas naturales más afectadas a nivel de vulnerabilidad ambiental correspondieron a los cuerpos de agua con 45,68 % del área en vulnerabilidad alta y media, seguido por los bosques con 43,41 % y la vegetación de páramo con 28,26 %. A nivel municipal, Jericó tiene la mayor área en vulnerabilidad alta con 54,8 %, seguido por Gámeza con 39 % y Socha con 28 %. El municipio de la Chita presenta mayor porcentaje de vulnerabilidad baja con 73,82 % (Figura 8).

Discusión

El estudio presentó una alternativa para la estimación de la vulnerabilidad ambiental en los páramos, que representan las interacciones entre los sistemas humanos y ambientales (Turner et ál. 2003). Los factores y variables definidas retomaron conceptos y procedimientos efectuados por otros acercamientos como Evaluation Vulnerability Index (EVI) (Li et ál. 2006), indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) (Zhang et ál. 2017), componentes principales (PCA) (Liu et ál. 2020) y estructura del paisaje (Bourgoin et ál. 2020).

El componente espacial permitió de forma más sistemática la cuantificación y caracterización de la vulnerabilidad, coincidiendo con lo resaltado por Ippolito et ál. (2010), donde tanto las variables usadas como la combinación de los métodos de análisis espacial que representan las condiciones y presiones principales de los ecosistemas son adecuadas para definir la vulnerabilidad (Bourgoin et ál. 2020), generando resultados más completos (Song et ál. 2010). Los *hotspots* identificados usando Getis-Ord General G pueden ser considerados un marco alternativo espacialmente explícito en este tipo de estudios, coincidiendo con Li et ál. (2017), donde las relaciones de vecindad incluidas en el método son ventajosas frente a otros métodos de clasificación basados en PCA (Li et ál. 2006; Nandy et ál. 2015; Liu et ál. 2020) o en distribuciones (Song et ál. 2010; Xiaolei et ál. 2011; Pei et ál. 2015).

La heterogeneidad espacial de la vulnerabilidad en el área de estudio es el resultado de los efectos de intervención humana, que incide sobre la estructura y composición del paisaje y puede ser el factor más influyente a escala local como lo sugerido por Yang et ál. (2015). Lo anterior es consistente con el patrón encontrado en la región occidental, donde el borde del páramo y los cuerpos de agua han estado expuestos a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, la presencia de minería, influencia de los centros poblados y la densidad de vías, variables que han estado asociadas al cambio de uso del

suelo de los páramos (Cabrera y Ramírez 2014; Cárdenas Agudelo 2016; Etter et ál. 2020). Por su parte, la vulnerabilidad media se encontró asociada igualmente a los bordes occidentales de páramo y sobre pequeñas zonas en la región nororiental, donde la densidad poblacional y producción son menores, lo cual disminuye la severidad y velocidad de los cambios por usos del suelo pese a no tener figuras de protección a nivel regional ni nacional asociadas.

El mayor peso dado a las condiciones abióticas en el componente de sensibilidad puede estar relacionado a las características propias del ecosistema de páramo, tales como pendientes, temperatura y disponibilidad de carbono en el suelo y su relación con los servicios ecosistémico de regulación y abastecimiento hídrico, sobre los cuales hay consenso en cuanto a los posibles impactos debido a un cambio en la cobertura y uso del suelo (Cárdenas Agudelo 2016). Lo anterior coincide con otras investigaciones de vulnerabilidad ambiental (Li et ál. 2006; Cavazzana et ál. 2016; Mohamed, 2020), mostrando en este caso un mayor impacto en el ecosistema a medida que el valor de estas variables son más óptimas para un desarrollo agropecuario, es decir, los bordes del complejo de páramos. Los tipos de vegetación e índices de vegetación y de paisaje fueron factores relevantes, debido a que el estado de la vegetación y sus cambios en el tiempo representan las propiedades y respuestas visibles del ecosistema frente a factores abióticos, de presión y de resiliencia, una manera de entender el impacto de factores naturales y antrópicos y, por ende, la vulnerabilidad ecológica (Xiaolei et ál. 2011; Liao et ál. 2013; Pei et ál. 2015; Hong et ál. 2016; Perring et ál. 2016).

Los factores de exposición más relevantes coincidieron con las presiones principales que sufre el ecosistema de páramo como la agricultura, ganadería y minería (Vargas Ríos 2013), y que también son determinantes en otros ecosistemas a nivel mundial (Song et ál. 2010; Xiaolei et ál. 2011; Liao et ál. 2013; Choudhary, Boori y Kupriyanov 2018). Las actividades agropecuarias fueron las variables que más impactan la vegetación natural tal como se concluye en algunos estudios (Li et ál. 2006; Song et ál. 2010; Xiaolei et ál. 2011; Hong et ál. 2016; Choudhary, Boori y Kupriyanov 2018), con implicaciones para la degradación y vulnerabilidad de los ecosistemas, por lo cual la utilización de técnicas de análisis espacial para identificar el estado de las coberturas representó uno de los factores más determinantes junto con el índice de vegetación transformado Thiam's (TTVI). Dentro de este componente, se evidenciaron limitantes

asociadas con la escala espacial y temporal de la información, coincidiendo con lo encontrado por Adger (2006) y Yi y Jackson (2021), quienes indican la dificultad de incorporar la información espacial asociada a dinámicas sociales y económicas (población y producción), las cuales, a diferencia de otros estudios, no fueron relevantes, dado que generalmente están vinculadas a unidades de análisis político-administrativas que no representan la dinámica espacial y real de este componente.

El hecho de que la incidencia o peso de cada factor se comportó en algunos casos de manera diferente —como las actividades mineras donde su impacto, al igual que la presencia de incendios, es uno de los más altos a pesar de ocupar una pequeña área— se puede explicar por las condiciones de la actividad misma. Si bien el área de extracción minera en términos de extensión no se compara con otras presiones, los daños debido a la contaminación de los suelos, degradación, acidificación, contaminación de aguas superficiales y subterráneas son impactos prácticamente irreversibles en un ecosistema como el páramo, como lo establecen Vargas Ríos (2013) y Osorio Fernández (2015).

A pesar de que en la valoración de la resiliencia se incorporó la conectividad como un aspecto importante, nuestros resultados difieren de los estudios de Eguiguren-Velepucha et ál. (2016) y Mohamed (2020), los cuales encontraron que la variable de mayor importancia y representatividad son las figuras de protección. Esto se puede explicar debido a que las figuras de protección presentes en el páramo de Pisba tales como el PNN tienen poca representación en términos de área, llegando a cubrir únicamente el 26 % del área (Morales et ál. 2007). Se resalta que todo el PNN de Pisba coincidió con los *coldspots* mientras que los bordes de páramo coinciden con los *hotspots* donde hay uso intensivo del suelo y donde el índice de recuperación es negativo, acorde a lo encontrado por Valencia et ál. (2020) sobre la vulnerabilidad alta en alturas bajas.

De acuerdo con los resultados de clasificación de vulnerabilidad (Figura 6 y 7), se sugieren la conservación de la vegetación de páramos, bosques y cuerpos de agua, la restauración ecológica de bosques andinos ubicados en zonas de media y alta vulnerabilidad y en coberturas antrópicas, la mitigación de impactos mediante la mejora de técnicas de agricultura (labranza cero) y la aplicación de agricultura sostenible y paisajes multifuncionales con énfasis en recuperar la funcionalidad del ecosistema en términos de su biodiversidad de especies, recurso hídrico y del suelo.

Finalmente, aplicando metodologías basadas en sensibilidad, exposición y resiliencia, se identificó la vulnerabilidad del páramo de Pisba, que considera la inclusión sistemática de datos y técnicas espaciales, así como análisis multicriterio. Sin embargo, se considera que dentro del contexto de los páramos en Colombia existen dinámicas intrarregionales que pueden incidir en la importancia y pesos tanto de variables como factores, especialmente relacionados con el entorno socioeconómico local, lo cual coincide con lo planteado por Turner et ál. (2003) y De Lange et ál. (2010), sobre la complejidad de las dinámicas humano-ambientales en el momento de establecer metodologías de vulnerabilidad. Lo anterior refuerza lo encontrado en los estudios de Guarderas, Smith y Dufrene (2021) donde, en ecosistemas de páramos y bosques andinos del Ecuador, los factores económicos y las variables de presión inciden en la heterogeneidad de respuestas frente al uso del suelo, o donde en diferentes complejos de páramos en Colombia prima más el factor ecológico, ambiental, político o social (Garavito, Gómez y Palacio 2018). Pese a lo anterior, el estudio es una aproximación que puede facilitar las indagaciones sobre la vulnerabilidad en los páramos asociados a cobertura del suelo.

Se sugiere para futuras investigaciones la incorporación de expertos y habitantes locales, quienes afectan y se ven afectados por la vulnerabilidad de este ecosistema, y la inclusión de variables ecológicas relacionadas con la resiliencia del ecosistema basadas en la eficiencia de la vegetación para la provisión y regulación hídrica y el cambio de regímenes de disturbio mediante análisis de series de tiempo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la maestría en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo para la realización del presente estudio. Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, al Departamento Administrativo Nacional de Estadística y a Corpoboyacá por la información suministrada. A los expertos consultados por su disposición, tiempo y experiencias compartidas en el desarrollo del trabajo.

Referencias

Adger, W. Neil. 2006. "Vulnerability". *Global Environmental Change* 16 (3): 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>

- ANM (Agencia Nacional de Minería). 2021. "Mapa de títulos mineros. República de Colombia, Año 2021". Visor Geográfico Agencia Nacional de Minería ANM - Visor de títulos Mineros de Colombia. Consultado el 25 de noviembre de 2021. <https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=sigmext&locale=es-co&appAcronym=sigm>
- ASF (Alaska Satellite Facility). 2015. "Radiometrically Terrain Corrected" ALOS PALSAR products, Product Guide, Revision 1.2. Consultado el 12 de junio de 2021. <https://ASF.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/ALOS-PALSAR-RTC/ALOS-PALSAR-Radiometric-Terrain-Correction/>
- Bourgoin, Clément, Johan Oswald, Jeremy Bourgoin, Valéry Gond, Lilian Blanc, Hélène Dessard, Trong Van Phan, Plinio Sist, Peter Läderach y Louis Reymondin. 2020. "Assessing the Ecological Vulnerability of Forest Landscape to Agricultural Frontier Expansion in the Central Highlands of Vietnam". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 84: 101958. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101958>
- Cabrera, Marian y Wilson Ramírez, eds. 2014. *Restauración ecológica de los páramos en Colombia: transformación y herramientas para su conservación*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAVH).
- CAR-UNAL (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – Universidad Nacional de Colombia). 2018. *Guía ilustrativa sobre análisis de la vulnerabilidad territorial ante el cambio climático. Propuesta metodológica para los entes territoriales de la jurisdicción CAR*. Grupo de Cambio climático DGOAT CAR - Grupo de investigación "Tiempo, clima y sociedad" Universidad Nacional de Colombia. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5cc8af9bc943b.pdf>
- Cárdenas Agudelo, María Fernanda. 2016. "Ecohydrology of Paramos in Colombia: Vulnerability to Climate Change and Land Use". Tesis de doctorado en Ingeniería - Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Cavazzana, Guilherme H., Giancarlo Lastoria, Kennedy F. Roche, Taís G. T. Catalani y Antonio Conceição Paranhos-Filho. 2016. "Natural and Environmental Vulnerability Along the Touristic 'Estradas Parque Pantanal' by GIS Algebraic Mapping". En *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*, editado por Damià Barceló y Andrey G. Kostianoy, vol. 37 de la serie Handbook of Environmental Chemistry, 209-226. Switzerland: Springer Cham. https://doi.org/10.1007/698_2014_328
- Choudhary, Komal, Mukesh Singh Boori y Alexander Kupriyanov. 2018. "Spatial Modelling for Natural and Environmental Vulnerability through Remote Sensing and GIS in Astrakhan, Russia". *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21 (1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.09.001>

- and Space Science* 21 (2): 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.05.003>
- Cinner, Joshua E., Cindy Huchery, Emily S. Darling, Austin T. Humphries, Nicholas A. J. Graham, Christina C. Hicks, Nadine Marshall y Tim R. McClanahan. 2013. "Evaluating Social and Ecological Vulnerability of Coral Reef Fisheries to Climate Change". *PloS One* 8 (9): e74321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074321>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2014. "Censo Nacional Agropecuario". Boletín Técnico. Consultado 15 de junio de 2021. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2018. "Censo Nacional de Población y Vivienda". Boletín Técnico. Base Redatam 7 – WebServer. Consultado 15 de junio de 2021. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- De Lange, Hendrika J., Serenella Sala, Marco Vighi y Jack H. Faber. 2010. "Ecological Vulnerability in Risk Assessment - A Review and Perspectives". *Science of the Total Environment* 408 (18): 3871-3879. <https://doi.org/10.1016/j.scitenv.2009.11.009>
- Díazgranados Mauricio, Carolina Tovar, Thomas R. Etherington, Paula Rodríguez-Zorro, Carolina Castellanos-Castro, Manuel Galvis Rueda y Suzette G. A. Flantua SGA. 2021. "Ecosystem Services Show Variable Responses to Future Climate Conditions in the Colombian Páramos". *PeerJ* 9: e11370. <https://doi.org/10.7717/peerj.11370>
- Durán Gil, Carlos Alberto. 2017. "Análisis espacial de las condiciones de vulnerabilidad social, económica, física y ambiental en el territorio colombiano". *Perspectiva Geográfica* 22 (1): 11-32. <https://doi.org/10.19053/01233769.5956>
- Echeverría, Magdy, Carlos Rosero y Leys Bravo. 2018. "Vulnerabilidad a nivel de ecosistema de páramo frente al cambio climático en la zona de Igualata parroquia San Isidro, cantón Guano provincia de Chimborazo". *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas* 20 (39): 137-148.
- Eguiguren-Velepucha, Paúl Alexander, Juan Armando Maita Chamba, Nikolay Arturo Aguirre Mendoza, Tatiana Lizbeth Ojeda-Luna, Natalia Soledad Samaniego-Rojas, Michael J. Furniss, Carol Howe y Zhofre Huberto Aguirre Mendoza. 2016. "Tropical Ecosystems Vulnerability to Climate Change in Southern Ecuador". *Tropical Conservation Science* 9 (4). <https://doi.org/10.1177/1940082916668007>
- ESRI. 2022. "Sobre las versiones publicadas - Portal for ArcGIS | Documentación de ArcGIS Enterprise". 2022. Consultado el 15 de marzo de 2022. <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/10.6/use/about-versions.htm>
- Etter, Andrés, Angela Andrade, Cara R. Nelson, Juliana Cortés y Kelly Saavedra. 2020. "Assessing Restoration Priorities for High-Risk Ecosystems: An Application of the IUCN Red List of Ecosystems". *Land Use Policy* 99 (42): 104874. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104874>
- Garavito González, Leonardo, Diana Patricia Gómez Zárate y Dolly Palacio Tamayo. 2018. "Gobernanza territorial en los páramos Chingaza y Sumapaz-Cruz Verde. Una comparación de sus principales actores y problemáticas". *Perspectiva Geográfica* 23 (1): 11-30. <https://doi.org/10.19053/01233769.6703>
- Getis, Arthur y J. K. Ord. 1992. "The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics". *Geographical Analysis*, 24 (3): 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Gobernación de Boyacá. 2020. "Plan de Ordenamiento Territorial Departamental- POD". Informe preliminar. Gobernación de Boyacá, Tunja. Consultado el 15 de julio de 2021. <http://ordenamiento.boyaca.gov.co/pdotb/>
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau y Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone". *Remote Sensing Environment* 202: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guarderas, Adriana Paulina, Franz Smith y Marc Dufrene. 2021. "Land Use Land Cover Dynamics through Time and Their Proximate Drivers of Change in a Tropical Mountain System: A Case Study in a Highland Landscape of Northern Ecuador". *bioRxiv*, 467450. <https://doi.org/10.1101/2021.11.05.467450>
- Gutiérrez Rey, Hilda Jeanneth. 2002. "Aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando SIG con enfasis en la vulnerabilidad de las coberturas nival y de páramo de Colombia". En *Congreso mundial de páramos. Memorias Tomo I*. Organizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Conservación Internacional. 122-131. <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/35416#page=1>
- He, Hong S., Barry E. DeZonia y David J. Mladenoff. 2000. "An Aggregation Index (AI) to Quantify Spatial Patterns of Landscapes". *Landscape Ecology* 15: 591-601. <https://doi.org/10.1023/A:1008102521322>
- He, Li, Jing Shen y Yang Zhang. 2018. "Ecological Vulnerability Assessment for Ecological Conservation and Environmental Management". *Journal of Environmental Management* 206: 1115-1125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.059>

- Hong, Wuyang, Renrong Jiang, Chengyun Yang, Fangfang Zhang, Mo Su y Qi Liao. 2016. "Establishing an Ecological Vulnerability Assessment Indicator System for Spatial Recognition and Management of Ecologically Vulnerable Areas in Highly Urbanized Regions: A Case Study of Shenzhen, China". *Ecological Indicators* 69: 540-547. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.028>
- Huang, Pi-Hui, Jing-Shyan Tsai y Wen Tzu Lin. 2010. "Using Multiple-Criteria Decision-Making Techniques for Eco-Environmental Vulnerability Assessment: A Case Study on the Chi-Jia-Wan Stream Watershed, Taiwan". *Environmental Monitoring and Assessment* 168: 141-158. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1098-z>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2017. "Mapa de stock de carbono orgánico de Colombia, Año 2017". Infraestructura de Datos Abierto (ICDE). Consultado el 30 de noviembre de 2021. <https://datos.icde.gov.co/maps/c480507823e04357a5bf3d5727635df9/about>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2020. "Cartografía base escala 1:25.000. Datos abiertos Cartografía y Geografía – Geoportal IGAC". Consultado el 17 de enero de 2020. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Ippolito, Alessio, Serenella Sala, Jack H. Faber y Marco Vighi. 2010. "Ecological Vulnerability Analysis: A River Basin Case Study". *Science of the Total Environment* 408 (18): 3880-3890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.002>
- Kangas, Jyrki, Ron Store, Pekka Leskinen y Lauri Mehtätalo. 2000. "Improving the Quality of Landscape Ecological Forest Planning by Utilising Advanced Decision-Support Tools". *Forest Ecology and Management* 132 (2-3): 157-171. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00221-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00221-2)
- Khan, Shabana. 2012. "Vulnerability Assessments and Their Planning Implications: A Case Study of the Hutt Valley, New Zealand". *Natural Hazards* 64: 1587-1607. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0327-x>
- Kia, Masoud Bakhtyari, Saied Pirasteh, Biswajeet Pradhan, Ahmad Rodzi Mahmud, Wan Nor Azmin Sulaiman y Abbas Moradi. 2012. "An Artificial Neural Network Model for Flood Simulation Using GIS: Johor River Basin, Malaysia". *Environmental Earth Sciences* 67 (1): 251-264. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1504-z>
- Li, Ainong, Angsheng Wang, Shunlin Liang y Wancun Zhou. 2006. "Eco-Environmental Vulnerability Evaluation in Mountainous Region Using Remote Sensing and GIS - A Case Study in the Upper Reaches of Minjiang River, China". *Ecological Modelling* 192 (1-2): 175-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.005>
- Li, Yingjie, Liwei Zhang, Junping Yan, Pengtao Wang, Ningke Hu, Wei Cheng y Bojie Fu. 2017. "Mapping the Hotspots and Coldspots of Ecosystem Services in Conservation Priority Setting". *Journal of Geographical Sciences* 27 (6): 681-696. <http://doi.org/10.1007/s11442-017-1400-x>
- Liao, Xueqin, Wei Li y Jinxiang Hou. 2013. "Application of GIS Based Ecological Vulnerability Evaluation in Environmental Impact Assessment of Master Plan of Coal Mining Area". *Procedia Environmental Sciences* 18: 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.035>
- Liu, Yimeng, Saini Yang, Chuanliang Han, Wei Ni y Yuyao Zhu. 2020. "Variability in Regional Ecological Vulnerability: A Case Study of Sichuan Province, China". *International Journal of Disaster Risk Science* 11: 696-708. <http://doi.org/10.1007/s13753-020-00295-6>
- Malekmohammadi, Bahram y Fatemeh Jahanishakib. 2017. "Vulnerability Assessment of Wetland Landscape Ecosystem Services Using Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Model". *Ecological Indicators* 82: 293-303. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.060>
- Meneses Moreno, Luis Hernando, Luis Antonio Velasco Cáceres, Pedro Velasco Cordero y Hernán Roberto Rivera. 2006. *Plan de manejo Parque Nacional Natural de Pisba 2005-2009. Socha: Parques Nacionales Naturales de Colombia*.
- Mohamed, Soha A. 2020. "Coastal Vulnerability Assessment Using GIS-Based Multicriteria Analysis of Alexandria-Northwestern Nile Delta, Egypt". *Journal of African Earth Sciences* 163: 103751. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103751>
- Morales Rivas, Mónica, Javier Otero García, Thomas van der Hammen, Andrea Torres Perdigón, Camilo Esteban Cadena Vargas, Carlos Alberto Pedraza Peñaloza, Nelly Rodríguez Eraso, Carol Andrea Franco Aguilera, Juan Carlos Betabcourth Suárez, Édgar Olaya Ospina, Ernesto Posada Gilede y Luciano Cárdenas Valencia. 2007. *Atlas de Páramos de Colombia*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Naidoo, P., Egerton Hingston y K. Ribbink. 2015. "Slope Stability Analyses of the Proposed Reconstituted Slope of the Quarry Heights Drive Landslide, Durban, South Africa". En *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*, editado por Lollino, Giorgio, Daniele Giordan, Giovanni B. Crosta, Jordi Corominas, Rafiq Azzam, Janusz Wasowski y Nicola Sciarra, 1441-1445. Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_255
- Nandy, Subatra, C. Singh, Kousik K. Das, Nanette C. Kingma y Satya Prakash Singh Kushwaha. 2015. "Environmental Vulnerability Assessment of Eco-Development Zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India".

- Ecological Indicators* 57: 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.024>
- Nguyen, Kim-Anh y Yuei-An Liou. 2019. "Global Mapping of Eco-Environmental Vulnerability from Human and Nature Disturbances". *Science of the Total Environment* 664: 995-1004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.407>
- Obando Almeciga, David Estevan. 2019. "Cambio en el uso del suelo de los páramos colombianos a lo largo de la historia". Trabajo de Grado en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Omann, Ines, Andrea Stocker y Jill Jäger. 2009. "Climate Change as a Threat to Biodiversity: An Application of the DPSIR Approach". *Ecological Economics* 69 (1): 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.01.003>
- Osorio Fernández, Yesika. 2015. "Explotación minera en el páramo de Pisba-Boyacá". Trabajo de Grado en Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. 2021. "SINAP - Sistema Nacional de Áreas Protegidas, año 2021, formato shape". Consultado el 28 de noviembre de 2021. <https://runap.parquesnacionales.gov.co/>
- Pei, Huan, Shifeng Fang, Lu Lin, Zhihao Qin y Xiaoyan Wang. 2015. "Methods and Applications for Ecological Vulnerability Evaluation in a Hyper-Arid Oasis: A Case Study of the Turpan Oasis, China". *Environmental Earth Sciences* 74: 1449-1461. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4134-z>
- Perring, Michael P., Pieter De Frenne, Lander Baeten, Sybrynn L. Maes, Leen Depauw, Haben BlonDeel, María M. Carón y Kris Verheyen. 2016. "Global Environmental Change Effects on Ecosystems: The Importance of Land-Use Legacies". *Global Change Biology* 22 (4): 1361-1371. <https://doi.org/10.1111/gcb.13146>
- Ramírez Gómez, Juan Camilo. 2022. "Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)". Tesis de Maestría en Geomática, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rezaei, Farshad, Hamid R. Safavi y Azadeh Ahmadi. 2013. "Groundwater Vulnerability Assessment Using Fuzzy Logic: A Case Study in the Zayandehrood Aquifers, Iran". *Environmental Management* 51: 267-277. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9960-o>
- Riitters, Kurt, James Wickham, Robert O'Neill, Bruce Jones y Elizabeth Smith. 2000. "Global-Scale Patterns of Forest Fragmentation". *Conservation Ecology* 4 (2). <https://doi.org/10.5751/es-00209-040203>
- Rivera Ospina, David y Camilo Rodríguez. 2011. *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/af8c95d4-bf2b-41ac-baec-87cf039d2513>
- Rodríguez Castiblanco, Edgar Alexander, Jesús Hernando Sandoval Ramírez, Jorge Leonardo Chaparro Cordón, Gustavo Adolfo Trejos González, Enif Medina Bello, Karol Constanza Ramírez Hernández, Eduardo Castro Marín, Jorge Arturo Castro Guerra y Gloria Lucía Ruiz Peña, eds. 2017. *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Saaty, Thomas L. 1977. "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures". *Journal of Mathematical Psychology* 15 (3): 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Salvati, Luca, Ilaria Tombolini, Luigi Perini y Agostino Ferrara. 2013. "Landscape Changes and Environmental Quality: The Evolution of Land Vulnerability and Potential Resilience to Degradation in Italy". *Regional Environmental Change* 13: 1223-1233. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0437-3>
- Senisterra, Gabriela Elba, Fernanda Julia Gaspari y María Isabel Delgado. 2015. "Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural, Argentina". *Revista Estudios Ambientales* 3 (1): 38-58 <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v3i1.1047>
- Song, Guoba, Yu Chen, Meirong Tian, Shihai Lv, Shushen Zhang y Suling Liu. 2010. "The Ecological Vulnerability Evaluation in Southwestern Mountain Region of China Based on GIS and AHP Method". *Procedia Environmental Sciences* 2: 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.051>
- Turner, B. L., Roger E. Kasperson, Pamela A. Matson, James J. McCarthy, Robert W. Corell, Lindsey Christensen, Noelle Eckley, Jeanne X. Kasperson, Amy Luers, Marybeth L. Martello, Colin Polksky, Alexander Pulsipher y Andrew Schiller. 2003. "A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100 (14): 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Valencia, Jhon B., Jeison Mesa, Juan G. León, Santiago Mardriñán y Andrés J. Cortés. 2020. "Climate Vulnerability Assessment of the Espeletia Complex on Páramo Sky Islands in the Northern Andes". *Frontiers in Ecology and Evolution* 8: 565708. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.565708>
- Vargas Ríos, Orlando. 2013. "Disturbios en los páramos andinos". En *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*, editado por Jimena Cortés-Duque y Carlos Enrique Sarmiento Pinzón, 39-58.

- Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Xiaolei, Zhou, Yan Yuee, Wang Hui, Zhang Feng, Wu Liyu y Ren Jizhou. 2011. "Assessment of Eco-Environment Vulnerability in the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, China". *Environmental Earth Sciences* 63: 667-674. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0731-z>
- Yang, Saini, Shuai He, Juan Du y Xiaohua Sun. 2015. "Screening of Social Vulnerability to Natural Hazards in China". *Natural Hazards* 76: 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1225-1>
- Yi, Chuixiang y Nathan Jackson. 2021. "A Review of Measuring Ecosystem Resilience to Disturbance". *Environmental Research Letters* 16 (5): 053008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdf09>
- Zadeh, L. A. 1965. "Fuzzy Sets". *Information and Control* 8 (3): 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, Xianqi, Likang Wang, Xiaoshuang Fu, Hao Li y Cundong Xu. 2017. "Ecological Vulnerability Assessment Based on PSSR in Yellow River Delta". *Journal of Cleaner Production* 167: 1106-1111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.106>
- Zhao, Jincai, Guangxing Ji, Yuan Tian, Yulong Chen y Zheng Wang. 2018. "Environmental Vulnerability Assessment for Mainland China Based on Entropy Method". *Ecological Indicators* 91 (August): 410-422. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.016>

Juan Camilo Ramírez Gómez

Ingeniero Geógrafo y Ambiental con especialización en Gestión Ambiental de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Magíster en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia. Experiencia en análisis espacial enfocado a estudios ambientales, gestión del riesgo y ordenamiento territorial.

Nelly Rodríguez Eraso

Ingeniera Forestal por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctora en Ecología Terrestre por la Universidad Autónoma de Barcelona. Actualmente es profesora asociada del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Experiencia en el área de análisis y modelación espacial asociado a estudios de biodiversidad, conservación y servicios ecosistémicos.

Anexo 1. Descripción de las variables asociadas a la vulnerabilidad ambiental y sus métodos de cálculo

Factor	Descripción de la variable	Método de cálculo/ Fuente de información	Ecuación/Algoritmo
Exposición			
Estado de la vegetación	Índice de vegetación transformado Thiam's. Calcula el verdor de la vegetación, permitiendo una mejor discriminación.	Se calculó con las bandas infrarrojo e infrarrojo cercano de la imagen Landsat en GEE a partir imágenes de Landsat 8 - 2020 con resolución 30 metros.	$TTVI = \sqrt{ABS(ndvi + 0,5)}$
	Tipo de cobertura del suelo	Obtenido a partir de la aplicación de Random Forest usando Landsat 8, 2020 con una resolución de 30 m y Google Earth Engine (Gorelick et ál. 2017).	Random Forest
Estructura del paisaje	Índice de diversidad de Shannon. Mide tanto la riqueza (número de clases de cobertura) como la regularidad (distribución de la superficie de las clases de coberturas) (Bourgoin et ál. 2020).	Mapa de coberturas del suelo 2020 (Figura 1) y cálculo del índice de diversidad con tamaño de pixel de 30 m.	$AI = 1 + \frac{[(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{i,j})]}{2 \ln(n)}$
	Índice de agregación (AI). Definido como el número de coberturas por clase, sobre el número total de coberturas para todo el paisaje (He et ál. 2000).		$\frac{\sum \text{Cobertura natural}}{\text{Total de coberturas}}$
	Densidad de borde (ED). Suma de longitudes de todos los segmentos del paisaje, sobre el área total del paisaje.		$\frac{\sum \text{Segmentos de borde (m)}}{\text{Total del área (m}^2)}$
	Área promedio de parche (MPA). Establece el área promedio de los parches identificados por cada clase de cobertura.		$\frac{\sum \text{área del parche (m}^2)}{\text{Total de parches}}$
	Densidad de parches (PD). Describe la densidad de los parches en relación con su número por área (Bourgoin et ál. 2020).		$\frac{\sum \text{Número de parches}}{\text{Área total}}$
Condiciones abióticas del ecosistema	Pendientes Cambio de Z respecto a un plano (X, Y) (Naidoo et ál. 2015).	Se usó el DEM ALOS PALSAR (ASF 2015), con una resolución de 12,5 m.	$P = ATAN \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \frac{180}{\pi}$
	Altura Corresponde a las elevaciones con respecto a nivel del mar.		m.s.n.m.
	Temperatura Corresponde a la temperatura media del aire a lo largo de un año.	Interpolación con Co-Kriging de datos de estaciones meteorológicas del IDEAM y el DEM ALOS PALSAR (ASF 2015), con una resolución de 12,5 m.	$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i)$
	Área de amortiguamiento de los cuerpos de agua.	Cartografía base escala 1:25.000 (IGAC 2020). Análisis de distancia euclíadiana.	$d(a, b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$
	Índice topográfico de humedad. Corresponde a las áreas potencialmente almacenadoras de humedad o zonas de acumulación de agua.	Se calculó mediante DEM ALOS PALSAR, (ASF 2015), con una resolución de 12,5 m, identificando la acumulación de flujo, área de captación específica y las pendientes.	$TWI = LN \left(\frac{SCA}{\tan \theta} \right)$
	Carbono Orgánico Contenido de carbono orgánico del suelo hasta 30 cm de profundidad.	Mapa de stock de carbono orgánico escala 1:100.000 (IGAC 2017). Interpolación mediante Kriging simple.	Kriging Simple

Factor	Descripción de la variable	Método de cálculo/ Fuente de información	Ecuación/Algoritmo
Sensibilidad			
Población	Densidad poblacional Número de personas que habitan una zona por hectárea.	Procesos de <i>join</i> a nivel de veredas con la información de REDATAM (DANE 2018).	$\frac{\text{Total de población rural}}{\text{Área (ha)}}$
Actividad minera	Distancia minería ilegal	Distancia euclíadiana mediante ArcGIS a partir de puntos de minería ilegal (Gobernación de Boyacá 2020).	$d(a, b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$
	Distancia a títulos mineros vigentes	Asignación de un valor de 1 para zonas con títulos y 0 para zonas sin títulos a partir de información de títulos mineros de la ANM (2021).	<i>Binario: 0 y 1</i>
Infraestructuras	Distancia centros poblados	Distancia euclíadiana a partir de centros poblados de cartografía base escala 1:25.000 (IGAC 2020).	$d(a, b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$
	Distancias vías principales, secundarias y terciarias.	Distancia euclíadiana a partir de vías de cartografía base 2020 escala 1:25.000 (IGAC 2020).	$d(a, b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$
Actividades agropecuarias	Producción pecuaria. Describe la producción de cabezas de ganado por hectárea.	Datos del censo agropecuario (DANE 2014) a nivel de veredas.	$\frac{\text{Cabezas de ganada}}{\text{Área (ha)}}$
	Producción agrícola. Describe las hectáreas sembradas por vereda.		$\frac{\text{Hectáreas sembradas}}{\text{Área (ha)}}$
	Distancia usos del suelo agropecuarios	Distancia euclíadiana de la clase de pastos y cultivos del mapa de coberturas del suelo con una resolución de 30 m (Figura 1).	$d(a, b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$
Incendios	Frecuencia de incendios. Determina la frecuencia de los incendios de la cobertura vegetal para el periodo de 2016-2020.	Cálculo del diferencial del índice de vegetación quemada con imágenes Landsat 8 para los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020. Grillas de 300x300 m.	$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ $\Delta NBR = NBR(\text{Prefire}) - NBR(\text{postfire})$
Resiliencia			
Protección	Figuras de protección nacional, regional o local.	Identificación de las distintas zonas de protección y asignación de valores (Parques Nacionales Naturales de Colombia 2021).	<i>Nacional: 1 Regional: 0,5 Sin protección 0</i>
Recuperación	Índice de recuperación. Es la capacidad de un ecosistema para volver a su estado original o también se puede definir como radio de recuperación vegetal (Yi y Jackson 2021).	Cálculo del índice de vegetación normalizado Thiam's para el periodo 1999 a 2020 usando imágenes Landsat 5 y 8 con una resolución de 30 m y aplicación de la tasa de recuperación.	$\frac{\Delta(NDVI 2020 - NDVI 1999)}{NDVI 1999}$
Conectividad	Conectividad Establece el índice de conectividad de las coberturas vegetales naturales, a partir del análisis de vecindades (Riitters et ál. 2000).	Se usó el mapa de cobertura del suelo del año 2021 con una resolución de 30 m (Figura 1) y un análisis de conectividad mediante la identificación de los pares de pixel de cobertura natural respecto a una grilla de análisis de 3x3 pixel.	$\frac{\sum \text{Pares con ambos pixel de cobertura natural}}{\sum \text{Pares con al menos un pixel de cobertura natural}}$