



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **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).**

**Juan Camilo Ramirez Gómez**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ciencias agrarias

Bogotá, Colombia

2022/08/12



# **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).**

**Juan Camilo Ramírez Gómez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Geomática**

Directora:

Ph.D en Ecología Nelly Rodríguez Eraso

Línea de Investigación:

Geoinformación para el uso sostenible de los recursos naturales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ciencias agrarias

Ciudad, Colombia

2022/08/12



*Dedicatoria*

*A mis padres y a mis hermanos.*

# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Juan Camilo Ramirez Gómez

Nombre

Fecha 12/08/2022

## Resumen

La evaluación de la vulnerabilidad es esencial para la toma de decisiones en el marco de la gestión ambiental y la conservación de los ecosistemas. Igualmente, es un proceso complejo que combina factores biofísicos, sociales y económicos, donde el uso de la geomática, brinda un soporte conceptual y técnico para su integración y análisis. El presente trabajo se enfocó en proponer y aplicar una metodología para evaluar la vulnerabilidad del Complejo de Páramos del Pisba (Departamento de Boyacá) asociada a la cobertura del suelo, aplicando análisis espacial y un enfoque de jerarquía analítica (AHP). Se identificaron 25 variables agrupadas en 11 factores que reflejan la sensibilidad, exposición y resiliencia del ecosistema trabajadas a una escala de 1:25.000. Mediante un análisis de percepción remota, geoestadística, distancias euclidianas y análisis del paisaje, los factores con mayor incidencia fueron: estado de la vegetación, condiciones abióticas, actividades agropecuarias e incendios. Los bordes occidentales del páramo tienden a ser más vulnerables, asociados a los cambios en coberturas por actividades antrópicas. Se encontró que el 18,06% del área de estudio presenta una vulnerabilidad alta, 21,96% una vulnerabilidad media y 59,98% vulnerabilidad baja, donde los hotspots están ubicados en zonas de borde. En general el Complejo de Pisba tienen cerca de 46461 ha en categorías alta y media de vulnerabilidad, siendo las coberturas naturales más afectadas los bosques (10,6% y 32,82% en vulnerabilidad alta y media respectivamente), seguido por la vegetación de paramo (10,18% y 18,18% en vulnerabilidad alta y media respectivamente). Se espera que la presente investigación, se pueda replicar en los diferentes páramos de del país, previendo diferencias intra-regionales, que ayuden a generar acciones urgentes de manejo en estos ecosistemas estratégico, a partir de información espacial disponible, usando elementos que desde la Geomática como ciencia, soportan la identificación y análisis de la vulnerabilidad ambiental para la planificación ambiental del territorio.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad ambiental, Páramo de Pisba, Análisis espacial, Análisis multicriterio

## Abstract

**Title: Methodology to assess environmental vulnerability in moorland ecosystems associated with land use: A case study of the Pisba moorland complex (Boyacá, Colombia).**

Vulnerability assessment is essential for decision-making in the framework of environmental management and ecosystem conservation. Likewise, it is a complex process that combines biophysical, social, and economic factors, where the use of geomatics provides conceptual and technical support for its integration and analysis. The present work focused on proposing and applying a methodology to assess the vulnerability of the Pisba moorland complex (Department of Boyacá) associated with land cover, applying spatial analysis and an analytical hierarchy approach (AHP). 25 variables grouped into 11 factors that reflect the sensitivity, exposure, and resilience of the ecosystem were identified. Through an analysis of remote sensing, geostatistics, Euclidean distances, and landscape analysis, the factors with the highest incidence were: the state of the vegetation, abiotic conditions, agricultural activities, and fires. The western edges of the páramo tend to be more vulnerable, associated with changes in coverage due to anthropic activities. It was found that 18.06% of the study area has high vulnerability, 21.96% medium vulnerability, and 59.98% low vulnerability, where the hotspots are located in border areas. In general, the Pisba Complex has about 46,461 ha in high and medium vulnerability categories, with the most affected natural cover being forests (10.6% and 32.82% in high and medium vulnerability, respectively), followed by the vegetation of moorland (10.18% and 18.18% in high and medium vulnerability, respectively). It is expected that this research can be replicated in the different moors of the country, anticipating intra-regional differences that help generate urgent management actions in these strategic ecosystems, based on available spatial information, use of spatial methodologies that support the identification, and environmental vulnerability analysis.

**Keywords: Environmental vulnerability, Páramo de Pisba, Spatial analysis, espacial, Multi-criteria decision analysis**



# Contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1    CONTEXTO.....	14
1.2    ANTECEDENTES.....	16
1.3    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.4    PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.5    OBJETIVOS.....	19
1.5.1 <i>General</i> .....	19
1.5.2 <i>Específicos</i> .....	19
<b>2. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>20</b>
2.1    CONCEPTOS TEÓRICOS.....	20
2.1.1 <i>Ecosistema de páramo</i> .....	20
2.1.2 <i>Vulnerabilidad ambiental</i> .....	24
2.1.3 <i>El análisis espacial dentro del estudio ambiental</i> .....	25
2.2    ESTADO DEL ARTE.....	29
2.2.1 <i>Investigaciones sobre vulnerabilidad de los ecosistemas de páramos</i> .....	29
2.2.2 <i>Evaluación de la vulnerabilidad usando técnicas espaciales y selección de variables</i> .....	31
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>38</b>
3.1    DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMO.....	38
3.2    EVALUACIÓN LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE SU APLICACIÓN EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ, COLOMBIA).....	43
3.2.1 <i>Área de estudio</i> .....	43
3.2.2 <i>Aplicación de la metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental</i> .....	44
3.3    ANÁLISIS DE PATRONES ESPACIALES DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN EL ECOSISTEMA DE PÁRAMO PARA DETERMINAR LAS ZONAS PRIORITARIAS DE GESTIÓN.....	46
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1    DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMO.....	48

10 Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

---

4.1.1	<i>Selección y descripción de factores y variables asociadas a la vulnerabilidad ambiental y su aplicación al Complejo de páramos de Pisba</i> .....	48
4.1.2	<i>Normalización de variables</i> .....	60
4.1.3	<i>Integración de variables y factores mediante AHP y cálculo del índice de vulnerabilidad.</i> .....	62
4.2	EVALUACIÓN LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE SU APLICACIÓN EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ, COLOMBIA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
4.2.1	<i>Espacialización de variables por cada factor asociado a la vulnerabilidad ambiental.</i> .....	66
4.2.2	<i>Establecimiento de pesos de variables y factores la vulnerabilidad a partir del modelo multicriterio</i> .....	76
4.2.3	<i>Cálculo del índice de vulnerabilidad</i> .....	82
4.3	IDENTIFICACIÓN DE PATRONES ESPACIALES PARA LA VULNERABILIDAD. ....	86
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>91</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>97</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	97
6.2	RECOMENDACIONES .....	98
<b>A.</b>	<b>ANEXO: MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES.</b> .....	<b>101</b>
<b>B.</b>	<b>ANEXO: DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS PARA LOS ÍNDICES DE LAS VARIABLES</b> .....	<b>103</b>
<b>C.</b>	<b>ANEXO: MEDIA DE LOS FACTORES PARA CADA COBERTURA</b> .....	<b>105</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>111</b>

## Lista de figuras

FIGURA 2-1:	DISTRIBUCIÓN DE LOS PÁRAMOS EN COLOMBIA. ....	20
FIGURA 2-2:	DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LOS PÁRAMOS DE COLOMBIA. ....	22
FIGURA 2-3:	LÓGICA DIFUSA. ....	29
FIGURA 3-1:	ESQUEMA METODOLÓGICO PARA ZONIFICAR LA VULNERABILIDAD EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE PISBA. ....	40
FIGURA 3-2:	MARCO DE TRABAJO DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL. COMPONENTES IDENTIFICADOS A ESCALA LOCAL Y SU RELACIÓN CON OTRAS ESCALAS .....	41
FIGURA 3-3:	FLUJOGRAMA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL (ADAPTADO DE HE ET AL., 2018) <sup>42</sup>	
FIGURA 3-4:	ÁREA DE ESTUDIO. ....	44
FIGURA 4-1:	FACTORES SELECCIONADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL DE LA COBERTURA DEL SUELO A NIVEL DE COMPONENTES. ....	49
FIGURA 4-2:	ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMO. ....	65
FIGURA 4-3:	COBERTURAS DEL SUELO PARA EL COMPLEJO DE PÁRAMO DE PISBA PARA EL AÑO 2020 ..	66
FIGURA 4-4:	DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE CADA VARIABLE EN TÉRMINOS DE PORCENTAJES TOTALES DE ÁREA PARA LA SENSIBILIDAD .....	67
FIGURA 4-5:	COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS PARA CADA VARIABLE DE SENSIBILIDAD. ....	68
FIGURA 4-6:	MAPAS VARIABLES DE SENSIBILIDAD DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ)....	69
FIGURA 4-7:	DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES POR CADA VARIABLE EN TÉRMINOS DE PORCENTAJES TOTALES DE ÁREA PARA LA EXPOSICIÓN. ....	70
FIGURA 4-8:	COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS PARA CADA VARIABLE DE EXPOSICIÓN. ....	71
FIGURA 4-9:	MAPAS VARIABLES EXPOSICIÓN DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ) .....	72
FIGURA 4-10:	DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES POR CADA VARIABLE EN TÉRMINOS DE PORCENTAJES TOTALES DE ÁREA PARA LA RESILIENCIA. ....	73
FIGURA 4-11:	COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS PARA CADA VARIABLE DE RESILIENCIA. ....	74
FIGURA 4-12:	MAPAS DE VARIABLES DE RESILIENCIA DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ) 75	
FIGURA 4-13:	MAPAS DE FACTORES DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ) 79	
FIGURA 4-14:	PORCENTAJE DE ÁREAS TOTALES POR FACTORES .... <b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	
FIGURA 4-15:	COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS PARA LOS FACTORES CONSIDERADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL. ....	80

12 Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

---

FIGURA 4-16:	VALORES MEDIOS DE LOS FACTORES DE SENSIBILIDAD RESPECTO CADA TIPO DE COBERTURA DEL SUELO.....	81
FIGURA 4-17:	ÍNDICE DE SENSIBILIDAD, EXPOSICIÓN Y RESILIENCIA DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS PISBA (BOYACÁ)	83
FIGURA 4-18:	COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS PARA LOS COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD.	84
FIGURA 4-19:	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS PISBA (BOYACÁ) .....	85
FIGURA 4-20:	DISTRIBUCIÓN DEL ANÁLISIS DE CLÚSTER. ....	86
FIGURA 4-21:	ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS PISBA (BOYACÁ)	87
FIGURA 4-22:	DISTRIBUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD RESPECTO A LAS COBERTURAS PRESENTES EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA. ....	88
FIGURA 4-23:	CATEGORÍAS DE LA VULNERABILIDAD A NIVEL MUNICIPAL DENTRO DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA.....	89
FIGURA 4-24:	PORCENTAJE RELATIVO DE VULNERABILIDAD AMBIENTAL A NIVEL DE COBERTURAS DEL SUELO	89

## Lista de tablas

TABLA 2-1:	ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD A PARTIR DE LA GEOMÁTICA.....	33
TABLA 3-1:	CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS DE LANDSAT 8 .....	45
TABLA 4-1:	DESCRIPCIÓN DE LAS COBERTURAS DEL SUELO IDENTIFICADAS PARA EL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA.....	50
TABLA 4-2:	DESCRIPCIÓN Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A LOS FACTORES DE SENSIBILIDAD.....	50
TABLA 4-3:	DESCRIPCIÓN Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A LOS FACTORES DE EXPOSICIÓN.	56
TABLA 4-4:	DESCRIPCIÓN Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A LOS FACTORES DE RESILIENCIA.	59
TABLA 4-5:	ESTANDARIZACIÓN DE VARIABLES ASOCIADAS A LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL DEL COMPLEJO DE PÁRAMOS DE PISBA (BOYACÁ). .....	61
TABLA 4-6:	MATRIZ Y ESCALA DE COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO. ....	63
TABLA 4-7:	PESOS DE LAS VARIABLES Y FACTORES ASOCIADOS A LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL DEL COMPLEJO DEL PÁRAMO DE PISBA (BOYACÁ) .....	77
TABLA 4-8:	CORRELACIÓN ESPACIAL DE COMPONENTES.....	84
TABLA 4-9:	ACCIONES DE GESTIÓN SUGERIDAS PARA LAS ZONAS DE VULNERABILIDAD EN EL ECOSISTEMA	90

# 1. Introducción.

## 1.1 Contexto

La vulnerabilidad y sensibilidad ambiental, inciden sobre los sistemas biofísicos y socio-económico y es resultado del cambio ambiental global. Estos conceptos han sido ampliamente discutidos en gestión de riesgos y desastres naturales (Yang et al. 2015), desarrollo sostenible (Turner et al. 2003), crecimiento urbano (Hong et al. 2016), cambio climático (Cinner et al. 2013) y estudios ambientales (De Lange et al. 2010), siendo su estudio fundamental para identificar y prever posibles impactos sobre diferentes ecosistemas, facilitando de esta forma su gestión y conservación, así como el diseño de planes de desarrollo dentro de un marco de protección ambiental sostenible (Zhao et al., 2018).

La vulnerabilidad ambiental puede definirse como el grado en el cual un ecosistema probablemente experimente daños debido a una presión específica (Turner et al. 2003). En su evaluación es necesario la identificación de las características propias del ecosistema, las presiones que actúan sobre él y la capacidad de recuperación del mismo. Uno de los marcos de evaluación más utilizados para su determinación, se basa en la sensibilidad, la exposición y la resiliencia (Naciones Unidas 2009), donde el componente espacial proporciona una base para evaluar de manera más precisa la vulnerabilidad ambiental (Liu et al. 2020).

La Geomática como ciencia, junto con las tecnologías de sensores remotos y sistemas de información geográfica, han brindado diversidad de métodos y técnicas en la evaluación y diagnóstico de la vulnerabilidad ambiental (Awange & Kyalo Kiema 2013), así como en la delimitación de zonas altamente vulnerables a presiones antrópicas y efectos climáticos. Su uso ha facilitado el entendimiento de procesos y patrones espaciales en diferentes ecosistemas, a partir de características propias del entorno (Liu et al. 2020).

La percepción remota ayuda a identificar y clasificar las condiciones de la cobertura vegetal y sus cambios, reflejando la estructura e integridad del ecosistema a partir de la respuesta electromagnética de cada tipo de vegetación (Omann et al. 2009)(Jonse & Coutinho 2016). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitan la recolección, almacenamiento y manejo de la información espacial asociada a fenómenos naturales, tales como impactos sobre ecosistemas, modelos de comportamientos futuros, priorización de áreas de intervención, identificación de patrones espaciales por medio de la geoestadística, establecimiento de áreas de influencia mediante análisis de proximidad y generación de superficies continuas a partir de datos puntuales (Awange & Kyalo Kiema 2013). De esta forma, se facilita el entendimiento y delimitación de las condiciones propias de un ecosistema en términos de su vulnerabilidad, apoyando los procesos de toma de decisiones sobre el ordenamiento territorial y la conservación de los ecosistemas.

Los estudios de vulnerabilidad en Colombia se han enfocado en análisis de gestión del riesgo, tales como inundación, eventos torrenciales y fenómenos de remoción en masa (SGC 2017), análisis de vulnerabilidad social y económica (Durán Gil 2017), e impacto del cambio climático sobre diferentes ecosistemas estratégicos (CAR 2018), entre ellos los páramos. Estos ecosistemas de alta montaña, son importante para la provisión y regulación hídrica, así como soporte de muchas especies vegetales; no obstante, presentan una vulnerabilidad alta frente a presiones antrópicas, debido al cambio climático y a los patrones históricos de uso por parte de comunidades locales asociados a la expansión de actividades extractivas a gran escala y a su poca capacidad de resiliencia producto de las condiciones evolutivas (IAvH, 2011; Vargas 2013).

Pese a que se han adelantado estudios de vulnerabilidad a nivel nacional en los páramos, existen vacíos en las evaluaciones asociadas a las presiones directas por cambios de cobertura y usos del suelo, las cuales representan la mayor problemática para este ecosistema (Vargas 2013). Los páramos evolucionaron como islas biogeográficas, ocasionando que no desarrollaran gran capacidad de adaptación a presiones o disturbios tales como incendios, pastoreos, cambios de temperatura y actividades agrícolas, generando una alta vulnerabilidad a cualquier disturbio asociado a actividades antrópicas (Vargas 2013). Entender cuáles son los factores y los procedimientos más apropiados para evaluar la vulnerabilidad ambiental, incorporando tanto la percepción remota, el análisis espacial, el análisis multicriterio entre otros, es adecuado para la identificación de los factores de sensibilidad y exposición asociados a la cobertura vegetal, en ecosistemas estratégicos como el páramo. Por lo anteriormente expuesto, el presente estudio, se

enfocó en proponer y aplicar una metodología desde la perspectiva de la geomática, para evaluar la vulnerabilidad sobre la cobertura vegetal del páramo aplicada al Complejo de Páramos del Pisba (Departamento de Boyacá).

## 1.2 Antecedentes

El concepto de vulnerabilidad implica un proceso complejo de análisis para describir estados de los ecosistemas, la sensibilidad y resiliencia de los sistemas físicos y sociales, y para guiar el análisis normativo de las acciones para mejorar el bienestar del hombre, mediante la reducción del riesgo (Adger 2006).

El desarrollo de los estudios de vulnerabilidad ambiental se ha venido incrementando en los últimos años. Turner y colaboradores (2003), fueron unos de los primeros en hablar de vulnerabilidad ecosistémica, como una solución para identificar los problemas que tiene los cambios en la biosfera, resaltando la importancia de realizar análisis enfocados al lugar, es decir, teniendo en cuenta la ubicación de los fenómenos como un conjunto de condiciones espaciales humanas y bióticas y su relación con el entorno. Por otro lado, la geomática en los últimos años ha aportado gran parte de herramientas en torno a estudios ambientales, y con relación a la vulnerabilidad ambiental, ha generado el desarrollo de nuevos métodos, así como la incorporación de técnicas y tecnologías más precisas, que buscan modelos espaciales más cercanos a explicar los fenómenos naturales (Awange & Kyalo Kiema 2013). Los avances en esta materia, han llevado al diagnóstico de ecosistemas, la identificación de cambios ambientales, la espacialización de índices, el establecimiento de factores de vulnerabilidad mediante los análisis multicriterio espaciales, su zonificación y clasificación (Pei et al. 2015; Bagdanavičiute & Valiunas 2013).

Existen diferentes métodos para la identificación y cálculo de la vulnerabilidad ambiental, que incluyen jerarquía analítica difusa, donde a partir de un conjunto de factores, se evalúa su influencia en los componentes ambientales (Rezaei et al. 2013), o métodos con enfoques de minería de datos, como las técnicas de redes neuronales artificiales (ANN) (Kia et al. 2012). También se destacan el método de evaluación del paisaje por medio de indicadores (Salvati et al. 2013; Kangas et al. 2000), el método del proceso de jerarquía analítica (AHP) con el cual se ponderan las variables que puedan incidir en la vulnerabilidad (Song et al. 2010; Huang et al. 2010) y el método de análisis de



componentes principales (Khan 2012). Así mismo, existen modelos que utilizan combinaciones de los métodos anteriormente planteados.

De otro lado, los páramos al ser considerados islas biogeográficas, generan una fragilidad frente a los disturbios y esta es una de las razones fundamentales por las cuales la vegetación de páramo presenta una alta vulnerabilidad a presiones antrópicas (Vargas 2013). Para los ecosistemas de páramo no existen muchas investigaciones dedicadas a la estimación de la vulnerabilidad ambiental con énfasis en la cobertura y uso del suelo. Algunos estudios en estos ecosistemas se han enfocado en cambio climático (Jeanneth 2002; Moreno Ortigón & Palma Barragan, 2016; Cárdenas 2016), utilizando diversos escenarios, encontraron que los páramos a mediano plazo son más vulnerables a actividades antrópicas.

### **1.3 Planteamiento del problema**

La transformación y degradación de los ecosistemas asociada a una creciente demanda de tierras para la agricultura y la ganadería, son las principales causas de la disminución de la biodiversidad a nivel mundial, poniendo en riesgo la prestación de servicios ecosistémicos para el ser humano (Etter et al. 2020). Debido a esto, se han venido presentando transformaciones de ecosistemas que no habían sido intervenidos en regiones altamente biodiversas (Correa Ayram et al. 2020). Evaluar, cuantificar y cartografiar la distribución espacial de la vulnerabilidad ambiental causada por presiones antrópicas es urgente y necesario para la protección y restauración de los ecosistemas (Nguyen & Liou 2019).

En los últimos años, el concepto de vulnerabilidad se ha venido utilizando en diferentes ámbitos: ambientales, sociales y económicos (Elisa Zanella et al. 2012), con metodologías aplicadas a problemas y lugares específicos (Senisterra et al. 2015), cuantificándose generalmente a través de tres componentes: sensibilidad, exposición y resiliencia (Naciones Unidas 2009). Uno de los mayores retos en esta materia, consiste en efectuar análisis multisistémico de las condiciones propias de cada ecosistema en términos cuantitativos, identificando y asignándole pesos a las variables o factores de acuerdo a la problemática a evaluar. Debido a que estas variables son contexto dependiente del ecosistemas, la implementación de metodologías probadas en ecosistemas con características diferentes genera una problemática de aplicación (De Lange et al. 2010) y en ocasiones se vuelve un procedimiento subjetivo (Pei et al. 2015), lo que dificulta su

réplica ( Adger 2006;De Lange et al. 2010), al carecer de procedimientos y criterios claros, para identificar y tomar medidas frente a la vulnerabilidad (De Lange et al. 2010; Salvati et al. 2013).

La mayoría de investigaciones en Colombia sobre vulnerabilidad ambiental, han dejado de lado una serie de impactos, donde la vegetación y/o cobertura vegetal es el recurso directamente más afectado por las presiones antrópicas (Calvo González 2006). De igual forma, hay falencias sobre la evaluación de la vulnerabilidad ambiental dado que es un proceso complejo que involucra muchas variables, donde el uso de la geomática asociados al modelamiento, identificación de eventos históricos de transformación de la cobertura vegetal, identificación cuantitativa de factores detonantes de la sensibilidad y resiliencia del ecosistema y su validación a través de técnicas de autocorrelaciones espaciales o análisis multicriterios no representa su potencial para ser incorporados de manera sistemática en este tipo de estudios. Lo anterior genera un vacío de conocimiento en el tema, siendo necesario implementar investigaciones que incorporen el uso de metodologías cuantitativas e indicadores que utilicen un conjunto de datos espaciales acordes con las características del ecosistema y su entorno. Plantear una metodología que desde la ciencia de la Geomática permita identificar, espacializar y cuantificar las diferentes condiciones y presiones que afectan a los ecosistemas y coberturas de páramo, podrán optimizar la estimación de su vulnerabilidad, al basarse en métodos rápidos que puedan ser replicados a los ecosistemas paramunos del país, buscando la toma de medidas en el marco de la gestión y conservación de este importante ecosistema.

## 1.4 Preguntas de investigación

Con base en el planteamiento del problema, se propuso la siguiente pregunta general de investigación:

¿Cómo evaluar la vulnerabilidad ambiental del complejo de páramos de Pisba (Boyacá) con relación a las coberturas del suelo, usando aproximaciones espaciales?

Adicionalmente se propusieron tres preguntas específicas, asociadas al establecimiento de una metodología de evaluación para resolver la pregunta principal.

- ¿Cuáles son los principales factores espaciales que determinan la vulnerabilidad sobre la cobertura del suelo para el complejo de páramos de Pisba?
- ¿Cuál es el nivel de incidencia de cada factor en la zonificación de la vulnerabilidad para el complejo de páramos?

- ¿Qué patrones espaciales presentan las zonas con vulnerabilidad en complejo de páramos de Pisba y cuál es su relación con la cobertura del suelo?

Se espera que las variables asociadas a las actividades agrícolas, la estructura del paisaje y la presencia de zonas de protección tengan los mayores aportes o pesos para los factores de exposición, sensibilidad y resiliencia respectivamente. Respecto a la distribución espacial, se espera una agrupación de valores del índice de vulnerabilidad altos sobre los bordes de paramo, los clústeres de valores bajos se esperan estén sobre la región central del páramo, en especial donde se encuentra el PNN Pisba.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 General

Proponer una metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental asociada a la cobertura del suelo a partir de métodos de análisis espacial y multicriterio: caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia).

### 1.5.2 Específicos

- 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.
- Evaluar la metodología propuesta mediante su aplicación en el complejo de páramos de Pisba (Boyacá, Colombia).
- Analizar patrones espaciales de la vulnerabilidad ambiental asociadas a la cobertura vegetal en el complejo de páramo de Pisba (Boyacá, Colombia) para determinar las zonas prioritarias de gestión.

## 2. Marco de referencia

### 2.1 Conceptos teóricos

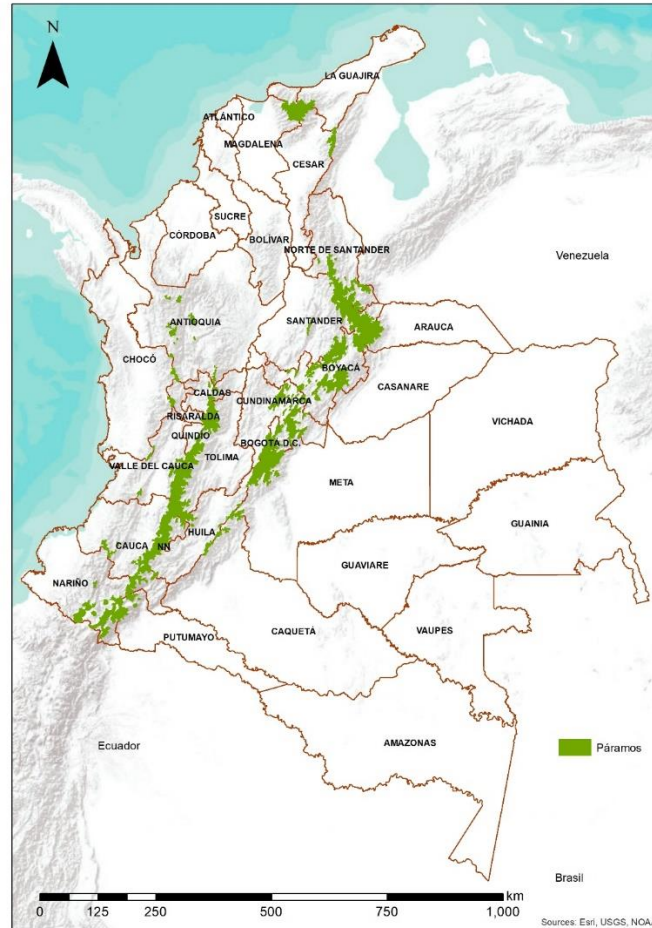
#### 2.1.1 Ecosistema de páramo

##### ▪ Características generales

Los páramos son ecosistemas de alta montaña, ubicados por encima del bosque andino, aproximadamente desde los 3.200 m.s.n.m. hasta los 4.200 m.s.n.m., que presentan diferentes formaciones vegetales a partir de su gradiente vertical: subpáramo, páramo y super páramo (Morales et al. 2007). Los páramos son considerados ecosistemas estratégicos principalmente por los servicios ecosistémicos que ofrecen para el bienestar humano, como la regulación hídrica y el abastecimiento del 70% del recurso hídrico para el consumo y las actividades económicas, así como su riqueza biológica única (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2019).

En Colombia, estos ecosistemas, presentan una extensión de 1.925.410 ha (2 % del país), de las cuales 746.644 ha hacen parte de Parques Nacionales Naturales (Rivera & Rodríguez 2011). De acuerdo al Instituto Humbolt (2007), se reconocen 34 complejos distribuidos sobre las cordilleras de los Andes y sobre la Sierra Nevada de Santa Marta (ver figura 2-1). En términos de representatividad, Boyacá se destaca por contar con la mayor extensión de estos ecosistemas con un 18,3% del total nacional, seguido de Cundinamarca, Santander, Cauca, Tolima y Nariño.

**Figura 2-1:** Distribución de los páramos en Colombia.



*Fuente: Elaboración propia con datos Humboldt (2007).*

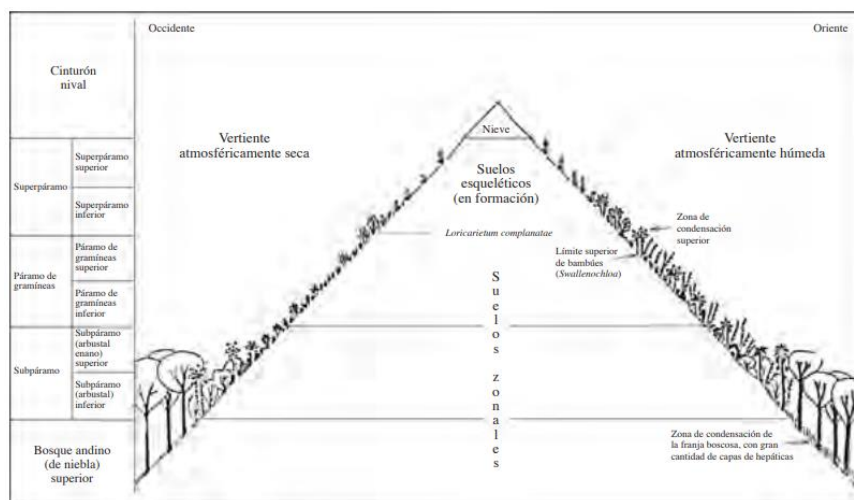
Los páramos presentan condiciones climáticas muy variadas en cuanto a precipitación, temperatura, luminosidad, duración del día de luz, humedad relativa y vientos. La temperatura oscila entre los 8°C hasta los 3°C, con cambios fuertes entre el día y la noche (Morales et al. 2007). En las precipitaciones existen diferencias considerables, encontrándose valores entre los 700 a 5000 mm, con distribuciones monomodales y binomiales. Los páramos más húmedos se encuentran sobre las zonas orientales de la cordillera Oriental y las zonas occidentales de la cordillera Occidental y los más secos se encuentran al interior de la cordillera Oriental. La humedad relativa presenta altos porcentajes de 80 % y 98% en su mayoría, con fuerte presencia de fenómenos de niebla (Morales et al. 2007).

Las formas geomorfológicas asociadas a los páramos son las altas montañas como crestas y cimas de gelifracción, laderas y derrubios de gelifracción, morrenas, depresiones y vallecitos y laderas de denudación. Generalmente, el material parental está representado por afloramientos de rocas ígneas y metamórficas en la cordillera central y occidental y

grandes extensiones de depósitos glaciares. En las depresiones se presentan capas orgánicas, y en las partes bajas de los valles se presentan sedimentos aluviales (Morales et al. 2007). La vegetación es un factor determinante en la formación del suelo, dado que las bajas temperaturas, ocasionan una lenta formación de humus y mineralización de restos orgánicos (Morales et al. 2007).

Los tipos de vegetación se pueden clasificar en subpáramos, páramo, super páramo y zona nival. El primero se encuentra desde los 3.000 hasta los 3.800 msnm aproximadamente, y presenta una vegetación arbustiva con bosque bajo y abundancia de *Arcytophyllum*, *Diplostephium*, *Pentacalia* y *Gynoxys* (*Asteraceae*), *Hypericum* (*H. laricifolium*, *H. ruscooides*, *H. juniperinum*), *Pernettya*, *Vaccinium*, *Bejaria* y *Gaultheria* (*Ericaceae*). En el páramo se encuentra vegetación arbustiva, con menor densidad, compuesta por gramíneas de macolla, del género *Calamagrostis* en áreas menos húmedas y en las zonas más húmedas se encuentran los bambúes del género *Chusquea* en asociación con los frailejones (Rivera & Rodríguez 2011). El suprapáramo presenta poca densidad de vegetación herbácea y finalmente en las zonas nivales se tiene poca o nula presencia de cobertura vegetal. El tipo de vertiente también determina las condiciones de la vegetación, ya que los fenómenos de barlovento determinan mayor condensación y humedad provocando un mayor crecimiento de la vegetación, mientras que en zonas de sotavento el crecimiento es más reducido (Morales et al. 2007) (Figura 2-2).

**Figura 2-2:** Distribución de la vegetación en los páramos de Colombia.



Fuente: Tomado del Atlas de los Páramos en Colombia (Morales et al. 2007).

### ▪ **Presiones sobre los ecosistemas de páramo:**

Los páramos al ser considerados islas biogeográficas, evolucionaron en aislamiento y son un ecosistema frágil frente a las presiones antrópicas, debido a que no desarrollaron adaptaciones a diferentes disturbios generando una capacidad de resiliencia baja (Vargas 2013). Estas características lo hacen un ecosistema vulnerable frente a actividades antrópicas como la quema indiscriminada, agricultura intensiva, ganadería, minería y cambio climático, afectando el recurso hídrico, cobertura vegetal paramuna, suelo, diversidad y las dinámicas ecosistémicas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2019; Cárdenas 2016; Vargas 2013). Pese a que en Colombia existen leyes que regulan este ecosistema como derecho fundamental sujeto de protección, la actual demanda productiva, extractiva y de crecimiento poblacional, puede incidir en su degradación y transformación intensiva.

Estos ecosistemas, han experimentado disturbios a lo largo del tiempo, que alteran su estructura, provocando cambios en sus condiciones bióticas y abióticas, y por ende afectan directamente su dinámica, modelan las distintas características a nivel de paisaje, ecosistemas y comunidades y pueden modificar las características del ecosistema en términos de resiliencia frente a disturbios futuros. Calvo González (2006) ha clasificado los disturbios en páramos en:

- Disturbios por agricultura: la expansión de la frontera agrícola principalmente asociada al cultivo de papa, es la problemática más notoria y recurrente, originando cambio parcial o total del uso del suelo, contaminación por uso de fertilizantes y poca capacidad de recuperación del ecosistema.
- Disturbios por fuego: están asociados a pequeñas zonas donde existe una condición seca y de acumulación de materia orgánica que puede originar fuegos de manera natural, los cuales son de baja frecuencia. También se presentan quemadas asociadas a actividades antrópicas y ganadería extensiva, con el fin de eliminar la fitomasa y aprovechar los nuevos brotes que se producen en zonas de pastoreo.
- Disturbios por ganadería: el pastoreo es un disturbio que tiene impactos directos e indirectos sobre el ecosistema, siendo el pisoteo del ganado uno de los efectos directos que afecta la cobertura vegetal, y altera la movilización de los nutrientes. Lo anterior, genera cambios en la distribución de biomasa y comportamientos de la fitomasa vegetal afectando la capacidad de recuperación de la cobertura vegetal

- Disturbios por minería: la actividad minera, aun cuando no es tan recurrentes, genera un mayor impacto sobre los ecosistemas de páramo, trayendo como consecuencia bajas tasas de recuperación y gran afectación en las dinámicas hidrológicas a causa de la contaminación, perdidas total de la cobertura vegetal, destrucción de habitas y fragmentación del ecosistema
- Disturbios por plantaciones de especies forestales: aunque se trata de un disturbio no tan recurrente, las plantaciones de especies forestales como pinos representan un gran impacto sobre el páramo, ya que destruyen el suelo y la vegetación adyacente, incidiendo en su capacidad para reciclar nutrientes y maximizar la regulación y retención hídrica (Vargas 2013).

### **2.1.2 Vulnerabilidad ambiental**

La vulnerabilidad ambiental puede definirse como el grado en el cual un ecosistema probablemente sufra daños, debido a la exposición ante un disturbio específico o estrés (Turner et al. 2003; Adger 2006). Hace referencia a las características funcionales y estructurales, que pueden llegar a ser afectadas por la exposición a diversos disturbios, provocados en su mayoría por factores antrópicos, y los cuales generalmente causan modificaciones en algunos de los componentes del ecosistema, afectando su funcionamiento y equilibrio (Liao et al. 2013).

Turner y colaboradores (2003) identificaron la vulnerabilidad ecosistémica, como una solución a problemáticas asociadas a los cambios en la biosfera, planteando varios elementos para su valoración: múltiples perturbaciones, exposición, sensibilidad del sistema, capacidad del sistema para hacerle frente (resiliencia), estructuración del sistema y escalas de peligros o amenazas, efectuando recomendaciones para el análisis de la vulnerabilidad mediante la sensibilidad, exposición y resiliencia, los cuales facilitan un desarrollo multifacético a diferentes escalas espaciotemporales.

Las herramientas disponibles para la identificación de la vulnerabilidad y análisis tales como la estructura de la cobertura vegetal, el uso de técnicas de percepción remota, la formulación de indicadores de estado y las validaciones de campo, cada día son más frecuentes y determinan de una forma más sistemática la sensibilidad del ecosistema (Gerardo et al. 2001). Pei y colaboradores (2015) afirma que no existen unos criterios



estándar para elegir los factores asociados a la vulnerabilidad, ya que cada sistema de acuerdo con sus características y dinámicas debe contemplar factores indicativos, operativos y representativos. Si bien cada estudio específico presenta características distintas, la vulnerabilidad deber estar enfocada en identificar tres componentes principales: sensibilidad, exposición, resiliencia (Naciones Unidas 2009).

- **Sensibilidad:** Refleja las características o componentes propios del ecosistema que tienen potencial para ser afectados por una presión determinada (Liao et al. 2013). Es decir, incluye los factores de estrés de los componentes del ecosistemas en su parte estructural, funcional o de relaciones tróficas (Malekmohammadi & Jahanishakib 2017).
- **Exposición:** Se asocia a indicadores que reflejan los posibles disturbios, así como las características propias del entorno que pueden generar un impacto directo al ecosistema.(Liao et al. 2013). Los factores antrópicos ayudan a identificar la exposición del ecosistema, así como el cálculo de variables relacionadas con actividades económica y sociales (Moizo Marrubio 2004).
- **Resiliencia:** Factores que reflejan la capacidad de resiliencia, así como las acciones que se toman para conservar el ecosistema (Omann et al. 2009); estos factores en su mayoría están asociados a zonas de protección y conservación, debido a que dichas zonas no se han intervenido y no se ha alterado la estructura y funciones propias del sistema (IDEAM 2012).

### 2.1.3 El análisis espacial dentro del estudio ambiental

El análisis espacial se puede definir como la identificación de los diferentes componentes del espacio, buscando el entendimiento, la representación, funcionamiento y dinámica de un fenómeno, conociendo patrones asociados a la geometría, tiempo y a una posición relativa (Thiemann & Sester 2018; Longley et al. 2005). Este tipo de análisis necesita el uso de datos con atributos que definan la temporalidad e información que pueda generar el modelamiento de algún fenómeno en específico (Galik 2013) y se enfocan en resolver problemas que deben solucionarse con prontitud, tales como una emergencia ante deslizamientos, inundaciones, incendios entre otros o en buscar la solución de problemas asociados al conocimiento (Longley et al. 2005).

La disponibilidad y avances de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los últimos años, ha venido incrementando la comprensión de fenómenos asociados a áreas del conocimiento como la salud, medio ambiente, geología y agronomía entre otras (Choudhary et al. 2018). Uno de los campos donde se han implementado técnicas de análisis espacial con frecuencia es en estudios ambientales, donde se busca representar fenómenos naturales, generado a partir de la espacialización de las condiciones propias de cada ecosistema, así como el modelamiento de impactos sobre los mismos (Awange & Kyalo Kiema 2013). Los métodos de análisis espacial facilitan el manejo y recolección de la información de carácter ambiental, así como la identificación, diagnóstico y prevención de disturbios, facilitando el entendimiento del funcionamiento y correlación espacial de eventos propios en los ecosistemas. Existen diferentes técnicas utilizadas en los diagnósticos de vulnerabilidad ambiental, los cuales buscan modelar las condiciones actuales e identificar zonas de futuros impactos (Thiemann & Sester 2018), tales como:

### ▪ **Percepción remota**

La percepción remota es una disciplina basada en tecnologías que permite capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de las coberturas terrestres, obtenidos desde sensores remotos y se usa comúnmente para reconocer patrones y características de la superficie terrestre. Uno de los usos de esta disciplina, es el mapeo de la cobertura del suelo, que se basa en clasificación de imágenes satelitales, evaluando las respuestas espectrales de una superficie, las cuales, pueden ayudar a discriminar entre diferentes tipos de cobertura (Jonse & Coutinho 2016). Las características de las coberturas reflejan y emiten energía electromagnética particular, en diferentes rangos, los cuales son capturados por el sensor y almacenados en cada píxel, con un nivel digital. Es una de las técnicas más utilizadas en el diagnóstico de características del ecosistema, con la cual se pueden identificar las condiciones de la cobertura vegetal, tales como: cambios de usos, estado de la vegetación y patrones paisajísticos, reflejando la estructura y cambios en el ecosistema (Omann et al. 2009). Entre los métodos más destacados para la identificación de coberturas enfocados a estudios ambientales se encuentra el algoritmo Random Forest y los análisis multitemporales.

**El Análisis multitemporal**, consiste en una serie de observaciones sobre un mismo espacio geográfico a lo largo de un tiempo o periodos sucesivos, las cuales se basan en

cambios en la respuesta espectral de una superficie. Este enfoque busca representar la estructura espacial a lo largo del tiempo, lo cual permite estimar comportamiento o tendencias espaciales (Baxter 1979). Estos análisis son muy utilizados en diagnósticos de cambios en las de coberturas en ecosistémicas, así como tendencias de variables frente a dimensiones temporales y espaciales (Thiemann & Sester 2018).

**Random Forest**, es un algoritmo de aprendizaje de máquina, que consiste en una combinación árboles de predicción, de modo que cada árbol depende de los valores de un vector de forma independiente y con la misma distribución para todos los árboles del bosque. Cada árbol de decisión en general es binario, es decir, solo existen dos posibilidades de las cuales se puede escoger. Esto llevado a la percepción remota consiste en plantear arboles de decisión basados en rangos espectrales, con los cuales se va clasificando cada valor de reflectancia partiendo de su longitud de onda y logrando asignar cada respuesta espectral a un grupo determinado de cobertura (Breiman 2001). Este método también es utilizado para identificar las huellas por incendios, ya que la cicatriz de área quemada es sensible a la onda corta infrarroja SWIR y la salud de la vegetación o la variación verde sensible a infrarrojo cercano (NIR) siendo un método exitoso en la clasificación en este tema (Bar et al. 2020).

### ▪ **Geoestadística**

La geoestadística se enfoca en la asociación espacial entre los factores observados en diferentes ubicaciones y la variación sistemática de los fenómenos en el espacio, identificando tanto la heterogeneidad como homogeneidad espacial (Getis 1995). El concepto de autocorrelación espacial es fundamental para la geoestadística y consiste en establecer el nivel de relación de los datos respecto a la distancia, es decir, aplicando la Ley de la geografía según Tobler “Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las más cercanas espacialmente están más relacionadas que las de mayor distancia” (Getis 1995). Esta autocorrelación proporciona medidas y descripciones útiles de los patrones y procesos espaciales y en los estudios ambientales, la autocorrelación espacial brinda una herramienta importante a la hora de identificar los factores incidentes en dinámicas ecosistémicas, estableciendo los impactos y sus posibles causas, correlacionando diferentes factores ambientales e intentando explicar el comportamiento mutuo (Fischer & Getis 1997).

Kriging es un método geoestadístico, que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de valores conocidos, donde se asume la distancia y dirección como una autocorrelación espacial, que se utiliza para explicar la variación en la superficie (espacio),

ponderando los valores medidos alrededor, para calcular la predicción de una zona sin mediciones. Es utilizado para elaborar superficies a partir de puntos muestreados, tales como datos climáticos, propiedades del suelo y características de la vegetación entre otros, (Li & Heap 2008).

### ▪ **Lógica difusa**

Un conjunto difuso es una clase sin límites bien definidos entre los elementos que pertenecen al mismo. En esta lógica los elementos pueden pertenecer parcialmente a varios conjuntos y es útil para definir la ambigüedad de la información en el mundo real (Zadeh 1965). Estos conjuntos siempre se definen con respecto a un conjunto nítido (1-0) llamado universo del discurso ( $x$ ), donde el grado de pertenencia de cada objeto se define con la función  $f(x)$ . La función podría representar el grado de dependencia de  $x$  al conjunto o no pertenencia (1-0), donde el grado de pertenencia puede tratarse de cualquier valor entre 0 y 1, y solo hay dos valores claramente definidos, cuando  $x = 1$  el objeto pertenece a **A** y cuando  $x = 0$  el objeto no pertenece a **A**, cuanto mayor sea el valor más pertenece al conjunto. (Malczewski 1999). En geografía, esta lógica ayuda a estandarizar variables espaciales partiendo de valores óptimos (1) y no óptimos (0), asignando valores intermedios y ayudando a representar capas que no poseen un límite definido, las cuales corresponden casi en su totalidad de las variables espaciales, tales como pendientes, alturas, datos climatológicos, indicadores ambientales, entre otros (Zadeh 1971).

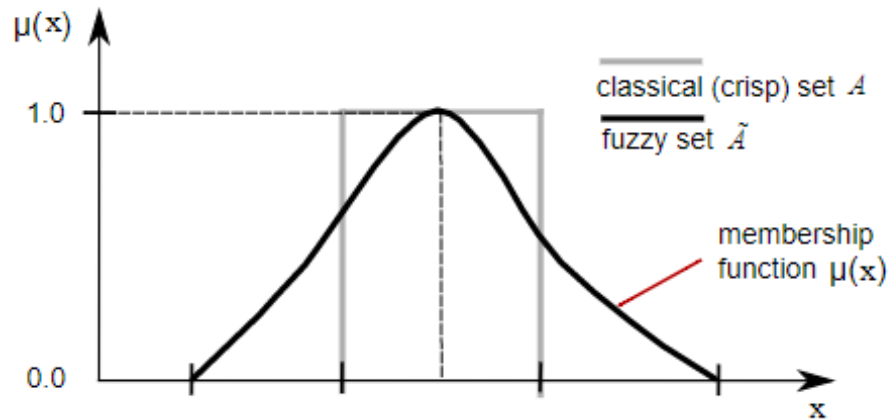
La Figura 2-3 muestra un ejemplo de la lógica difusa, indicando que los conjuntos clásicos o lógica booleana están más asociada a límites establecidos por valores de corte, mientras que la lógica difusa está determinada por una función.

### ▪ **Análisis multicriterio**

Los métodos multicriterio son herramientas utilizadas para la toma de decisiones, evaluando distintas soluciones e integrando múltiples aspectos (ambientales, sociales, económicas), a partir del análisis de criterios establecidos y planteando la mejor solución. (Barredo & Bosque-Sendra 1998). Han sido utilizados en su mayoría para establecer ponderación de variables espaciales y el proceso consiste en identificar la prioridad de variables en zonificaciones basado en criterios profesionales, consultas bibliográficas y conocimientos previos del entorno. Muchos estudios han integrado estos modelos de análisis multicriterio con las herramientas SIG, para generar zonificaciones, tomas de

decisiones y delimitaciones de zonas vulnerables en los ecosistemas (Ascough et al. 2008).

**Figura 2-3:** Lógica difusa.



*Fuente: Tomado de Fuzzy Semantics (Zadeh 1971).*

Los métodos multicriterio actualmente se pueden dividir en dos categorías (Huang et al. 2010): métodos centrados en el valor como la suma ponderada o método de jerarquía analítica (AHP), los cuales se basan en la asignación de pesos a cada criterio que representa su contribución al problema y Métodos de sobreclasificación o superioridad, los cuales se caracterizan por usar la sobrecalificación entre diferentes alternativas y usar como base los conceptos de concordancia y discordancia como el método PROMETHEE I y II (Jones & Tamiz 2016; Palacios Saldaña & Pacheco Bonrostro 2016).

## 2.2 Estado del arte

### 2.2.1 Investigaciones sobre vulnerabilidad de los ecosistemas de páramos

Los páramos son ecosistemas altamente vulnerables, que presenta una baja biomasa, crecimiento y descomposición lenta, productividad baja y acumulación de necromasa, lo cual genera una fragilidad elevada ante cualquier presión (Vargas 2013), y una susceptibilidad a la degradación del suelo, afectación de la capacidad de recuperación y contaminación de fuentes hídricas y pérdida de funcionalidad del ecosistema (Sarmiento Pinzón et al. 2013). A pesar de lo anterior y 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 Ospina & Rodríguez 2011).

Para los ecosistemas de páramos se han desarrollado diversos estudios asociados a la estimación de la vulnerabilidad ambiental, los cuales en su mayoría son enfocados a la vulnerabilidad por cambio climático, resaltándose la fragilidad del ecosistema frente a los posibles cambios en las condiciones meteorológicas especialmente en el aumento de temperatura y la presencia de sequías (Echeverría y colaboradores, 2018). El IDEAM (2012), reportó una disminución de la precipitación y un aumento de la temperatura máxima, cercanos a un grado centígrado por década en páramos altos, y 0,3°C en páramos bajos, encontrando un promedio de calentamiento de 0,17°C por década, superior a la reportada por el IPCC durante los últimos 50 años de 0,13°C.

Jeanneth (2002) en su estudio sobre la vulnerabilidad de las coberturas vegetales frente al cambio climático en Colombia, identificó que entre el 90 y 100% de los páramos podrían verse afectados, debido al desplazamiento altitudinal y cambios biogeográficos por variables climáticas. Moreno Ortegón & Palma Barragán (2016), evaluaron la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, mediante los cálculos de aumento de temperatura usando RCP 6,0, para el periodo de 1981-2095 y la determinación de diferentes indicadores de impacto potencial (sensibilidad) y potencial de recuperación, obteniendo que el 96,86% del páramo se reducirá para el escenario de 2095. Cárdenas (2016) realizaron una metodología para evaluar vulnerabilidad y resiliencia ecohidrológica de los ecosistemas de páramo colombiano al cambio climático, considerando los usos del suelo, en los páramos de Belmira, Romerales y Chingaza. Mediante los escenarios RCP: 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 y propiedades del suelo, uso de la tierra y procesos hidrológicos estos autores encontraron que el páramo de Chingaza tiene una vulnerabilidad muy baja y Belmira tiene una vulnerabilidad baja; mientras que los cambios proyectados en Romerales son críticos y los páramos más alterados por las actividades antrópicas evidencian la pérdida de algunas de sus características hidrológicas, lo cual los hacen más vulnerables al cambio climático.

Valencia y colaboradores (2020) realizaron una investigación para determinar la vulnerabilidad climática de *Espeletia* en los complejos de páramos colombianos. Se evaluó la sensibilidad climática del ecosistema comparando las distribuciones actuales y futuras de la especie, bajo el RCP 8.5 a 2050 con escenario de conservación; adicionalmente se

calculó la capacidad adaptativa de los complejos, mediante la identificación de la biodiversidad, áreas protegidas y área forestal alrededor del páramo, y como factores limitantes de la capacidad de adaptación se tomaron variables de agricultura, minería y densidad de población. Finalmente, se planteó el índice de vulnerabilidad climática a partir de la sensibilidad con la capacidad de adaptación. Como resultado se obtuvo que gran parte de las poblaciones de *Espeletia* presentan alta sensibilidad al cambio climático, generando el desplazamiento de hacia cumbres de montaña donde eventual mente no hay espacio para desarrollarse.

Cresso y colaboradores (2020) realizaron una investigación para determinar las condiciones hidro climáticas para el escenario 2060 y como esto afecta la extensión de los páramos en el Parque Nacional Chingaza, por medio de datos de precipitación, temperatura de referencia de 1960-1990 y simulaciones 2041-2060 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5; como resultado se obtuvo que la temperatura media aumentará en 1,8 y 2,4 °C en RCP 4,5 y RCP 8,5 respectivamente, el 39 y el 52% del área actual del páramo no será adecuada para estos ecosistemas.

Si bien estos estudios son esenciales en el marco de la conservación del páramo no se han desarrollado estudios de vulnerabilidad enfocados a presiones antrópicas tales como dinámicas de cambio de uso del suelo utilizando herramientas SIG, siendo este impacto uno de los principales sobre el ecosistema de páramo colombiano.

### **2.2.2 Evaluación de la vulnerabilidad usando técnicas espaciales y selección de variables**

Existen diferentes métodos para la identificación y cálculo de la vulnerabilidad ambiental, que incluyen jerarquía analítica difusa, donde a partir de un conjunto de factores, se evalúa la influencia en los componentes ambientales por medio de cálculos matemáticos (Rezaei et al. 2013), o métodos con enfoques de minería de datos, como las técnicas de redes neuronales artificiales (ANN) (Kia et al. 2012) usados con un enfoque espacial. También se destacan el método de evaluación del paisaje por medio de indicadores (Salvati et al. 2013; Kangas et al. 2000), el método del proceso de jerarquía analítica (AHP) con el cual se ponderan las variables que puedan incidir en la vulnerabilidad (Song et al. 2010; Huang et al. 2010) y el método de análisis de componentes principales (Khan 2012). Estos métodos se centran en técnicas de sobreposición de factores espaciales, para determinar el estado y la capacidad de resiliencia ecológica (Liao et al. 2013).

Choudhary y colaboradores (2018) plantearon un modelo espacial, con la identificación de cambio de cobertura, patrones de paisaje, variables de uso y estados de cobertura. Liao y colaboradores (2013) elaboraron una metodología para la zonificación de la vulnerabilidad utilizando la distribución de grillas, calculando tres tipos de índices: índices ecológicos, índices de sensibilidad ecológica e índices de composición y estructura ecológica, realizando posteriormente una intersección de capas cuyo resultado fue una zonificación de la vulnerabilidad. Duguy y colaboradores (2012) a partir de un método integral de múltiples índices, agruparon diversos indicadores de estado y respuesta del ecosistema. Usando sistemas de indicadores, Malekmohammadi & Jahanishakib (2017) y Zhang y colaboradores (2017), realizaron un estudio de vulnerabilidad basado en la aplicación del modelo Presión Estado Respuesta (PER). Este último trabajo encontró que los indicadores con mayor incidencia en la vulnerabilidad ambiental están asociados al aumento y densidad poblacional. Ippolito (2010) aplicó el mismo modelo PER, incluyendo caracterización de comunidades biológicas, concluyendo que el análisis de la vulnerabilidad puede ayudar a establecer las normas de calidad ambiental sobre los cuerpos hídricos. Song y colaboradores (2010a) plantearon un método combinando la integral de múltiples índices y los clasificaron con el método de jerarquía analítica AHP; Aryafar y colaboradores (2013) utilizaron el método de jerarquía analítica difusa, para encontrar la relación entre los distintos indicadores de estado y respuesta y Bourgoin y colaboradores (2020) propusieron un modelo de análisis del paisaje con el método integral de múltiples índices, utilizando técnicas de percepción remota.

Gran parte de las investigaciones en el tema, seleccionan variables de carácter espacial de acuerdo al ecosistema, partiendo de sus características, del enfoque de la vulnerabilidad usado y de las amenazas presentes (De Lange et al. 2010). Si bien, se observan diferentes agrupaciones de factores para la evaluación como los estudios con métodos PER O FPEIR, la mayoría de los estudios aborda la vulnerabilidad a partir del marco de los componentes: sensibilidad, la cual hace referencia a los factores propios del ecosistema que influyen en determinada presión; la exposición, que determina los factores y magnitud que representan una presión sobre el ecosistema y la resiliencia, que hace referencia a la capacidad del ecosistema para hacer frente a determinada presión y su capacidad de recuperación.

Dentro de los factores con mayor presencia para evaluar la vulnerabilidad, se identifican variables de usos del suelo, datos agropecuarios, coberturas del suelo y en algunos casos



indicadores de estructura paisajísticas. El proceso de unificación y cuantificación de variables depende de los enfoques de cada investigación, utilizando técnicas como el SPCA (análisis de componentes principales Sparse), PCA (análisis de componentes principales), algebra de mapas, modelos multicriterio y AHP (procesos de jerarquía analítica). La (Tabla 2-1), sintetizan algunas de las investigaciones de mayor relevancia en el tema de vulnerabilidad ambiental y su relación con el uso de técnicas espaciales.

**Tabla 2-1:** Antecedentes de estudios de vulnerabilidad a partir de la Geomática.

Autores	Objetivo	Ecosistema/ zona	Procedimiento	Resultados
Li y colaboradores (2006)	Desarrollar una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental utilizando teledetección y herramientas SIG, en la parte alta del Río Minjiang, China.	Cuenca alta del Río río Minjiang, con prevalencia de montañas y lomeríos con ecosistemas típicos de alta montaña.	Se seleccionaron factores de elevación, pendientes, temperatura, uso del suelo, vegetación, tipo de suelo, erosión, y densidad poblacional evaluados en diferentes años (1972, 1986, 2000). Se estableció un índice EVI ( <i>Evaluation Vulnerability Index</i> ), el cual integraba todos los factores seleccionados y posteriormente se utilizó el método sPCA (análisis de componentes principales Sparce), con el cual se establecieron los pesos de cada factor, identificándose 5 categorías de vulnerabilidad	Los factores que más incidieron en el EVI fueron el aumento de la densidad poblacional y el desarrollo de actividades agrícolas.
Song y colaboradores (2010)	Evaluación de la vulnerabilidad ecológica en la región montañosa del suroeste de China basada en el método AHP	Ecosistemas forestales montañosos.	Se planteó un método basado en 13 indicadores espaciales para reflejar la sensibilidad ecológica (ES), la presión natural y social (NSP) y la capacidad de recuperación ecológica (ERC). Con el método AHP (método de jerarquía analítica), los indicadores fueron clasificados en cinco categorías (potencial, leve, ligero, medio y pesado) y con uso de	Las zonas de vulnerabilidad se identificaron mediante un análisis de clúster. la mayor vulnerabilidad se asoció a la influenciada de indicadores relacionados con actividades agrícolas y una menor vulnerabilidad correspondió a los bajos niveles

34 Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

Autores	Objetivo	Ecosistema/ zona	Procedimiento	Resultados
			SIG se unificaron en un índice que reflejaba la vulnerabilidad.	en los indicadores de sensibilidad y altos índices de recuperación.
De Lange y Colaboradores (2010)	Revisión de los métodos de análisis de vulnerabilidad ecológica (poblaciones, comunidades y ecosistemas) con técnicas SIG.	No aplica	A partir de literatura de estudios sobre métodos para evaluar la vulnerabilidad, se efectuó una discusión en el tema, identificando métodos con enfoque en la vulnerabilidad ecológica de los ecosistemas y métodos enfocados en la vulnerabilidad socio-ecológica.	Se encontró que la vulnerabilidad de poblaciones, comunidades, hábitats o ecosistemas ha sido pobremente evaluada, mientras que, para los sistemas marinos, se ha prestado mucha atención a los derrames de petróleo. Se desarrolló un marco para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas ecológicos basados en los tres principios: sensibilidad, exposición y resiliencia.
Xiaolei y colaboradores (2011)	Método de evaluación de la vulnerabilidad ambiental al margen noreste de la meseta Qinghai-Tibetana, a partir factores de fragilidad y AHP.	Cuencas de del Río Amarillo, el Río Tao y el Río Daxia, en los que se destacan sistemas de bosques, regiones pantanosas y ríos.	Se establecieron dos factores principales: factores causa, compuesto por indicadores naturales y económicos, y factores resultado, compuesto por indicadores sociales. Estos factores fueron calculados mediante técnicas SIG y mediante AHP se establecieron los pesos de los índices y los factores. Por medio de algebra de mapas se calculó el índice total de vulnerabilidad, el cual fue clasificado en cuatro categorías, baja, media, alta y muy alta.	El factor natural tuvo un mayor peso de incidencia con respecto a los otros dos y los indicadores con mayor incidencia están asociados a disponibilidad y ocupación pecuaria.

Autores	Objetivo	Ecosistema/ zona	Procedimiento	Resultados
Liao y colaboradores (2013)	Metodología para la zonificación de la vulnerabilidad por el impacto de la minería de carbón	Ecosistemas montañosos donde prevalecen áreas muy secas, con poca vegetación y en algunos tramos se encuentran conectados con tierras arenosas.	El estudio seleccionó 9 índices asociados a tres componentes: índices ecológicos, índices de sensibilidad ecológica e índices de estructura del paisaje, representados espacialmente mediante cuadrículas. Los pesos de cada índice se establecieron mediante el método de AHP y se unificaron con álgebra de mapas, donde se identificaron 5 tipos de zonas: zona de explotación apropiada, zona de explotación optimizada, zona de explotación moderada, zona de explotación restrictiva y zona de explotación prohibida.	Se encontró las zonas con menos vulnerabilidad estaban asociadas a cultivos de arroz, presentando índices de salinización alto, mientras que las zonas con mayor vulnerabilidad estaban asociadas a actividades mineras, con los índices de desertificación y erosión elevados, siendo los indicadores con mayor influencia en la zonificación de la vulnerabilidad.
Huan Pei y colaboradores (2015)	Evaluación de la vulnerabilidad del Oasis de Turpan, China, mediante la identificación del mejor método acorde al área de análisis	Oasis de Turpan.	Se evaluó la vulnerabilidad, a partir de los índices de presión ecológica, sensibilidad ecológica y estabilidad ecológica, aplicando tecnologías SIG y de teledetección a partir de datos SPOT-5 y líneas de contorno (DEM). Para el establecimiento de los pesos se utilizó el método AHP y posteriormente se generó un índice de vulnerabilidad final clasificado en 5 categorías.	Se encontraron altos valores en los índices de presión asociado a la cercanía con ciudades. Los índices de estabilidad estuvieron asociados a zonas con oasis, y los altos índices de sensibilidad estuvieron asociados a las zonas con desertificación alta.
Eguiguren-Velepucha y colaboradores (2016)	Evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas tropicales para estimar los impactos en la integridad y las funciones	Se evaluaron diferentes ecosistemas tropicales del sur del ecuador, con temperaturas desde los 3° a los 26° C y	Se evaluaron las variables de exposición generadas a partir de escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5, variables de sensibilidad tales como uso de la tierra, densidad de carreteras, deforestación,	El escenario que presentó mayores zonas en vulnerabilidad alta fue el de RCP 8.5, con una incidencia alta en los ecosistemas selváticos y de

Autores	Objetivo	Ecosistema/zona	Procedimiento	Resultados
	ecológicas, en La Región Sur de Ecuador.	precipitaciones desde los 37 a los 6.000 mm lo cual determina una región con diferentes condiciones.	fragmentación y minería y variables de capacidad de adaptación como áreas protegidas, disminución de la población y herramientas de conservación. Se combinaron los factores mediante algebra de mapas, y para las variables categóricas se usó el método AHP. Se generaron los índices y zonificaciones para exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y vulnerabilidad.	alta montaña. Las variables con mayor nivel de importancia fueron las asociadas con el estado natural y las zonas de protección.
Cavazzana y colaboradores (2016)	Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental a lo largo de las entradas turísticas sobre el corredor Parque Pantanal partiendo del algebra de mapas.	Los ecosistemas principales corresponden a bosques amazónicos y bosques atlánticos	Partiendo de fotointerpretación y clasificación del suelo en 21 unidades, con criterios de estabilidad del paisaje o ecodinámica, se asignaron valores a 7 factores diferentes: uso y ocupación del suelo, conos de inundación, clima, vegetación, pedología, geomorfología y geología. Cada factor fue clasificado, asignándoles valores y mediante una suma de ráster se obtuvo el valor final de la vulnerabilidad, clasificándola en 5 categorías: vulnerable, moderadamente vulnerable, vulnerabilidad media, moderadamente estable y estable.	El factor que más incidió en la vulnerabilidad alta corresponde a las características geológicas del suelo que determina zonas más vulnerables a la erosión), por lo cual cualquier tipo de actividad genera un impacto directo sobre su recuperación.
Choudhary y colaboradores (2018)	Método para el modelado espacial de la vulnerabilidad ambiental a través de teledetección y	Ubicado sobre el delta del Río Volga, se encuentran principalmente ecosistemas de humedales.	Mediante técnicas de teledetección se identificaron las coberturas y usos del suelo y vegetación para los años 2000, 2007 y 2015, junto con datos de	Se encontró que el bosque ha presentado cambios a zonas agrícolas siendo el impacto más significativo de la

Autores	Objetivo	Ecosistema/ zona	Procedimiento	Resultados
	SIG en Astrakhan, Rusia		tipos de suelo, geología y geomorfología, se establecieron los factores determinantes de la vulnerabilidad. Los pesos de cada factor se establecieron mediante los valores de estabilidad de unidades paisajísticas, los cuales se encontraban de 0 y 3; posteriormente se realizó una suma ponderada y se determinaron 5 categorías.	vulnerabilidad ambiental. Los altos índices de vulnerabilidad por intensificación de usos, se asociaron al crecimiento poblacional.
Mohamed (2020)	Establecer un índice de vulnerabilidad ambiental costera relativa (CVI) en el delta del Nilo de Alejandría-noroeste, Egipto	Ecosistemas costeros constituidos por playas, así como ecosistemas de humedales como el lago Idku.	Basándose en análisis multicriterio y herramientas SIG, a partir de imágenes de sensores remotos y mapas topográficos, se realizó la clasificación de las coberturas del suelo; adicionalmente, se incluyeron variables de elevación y pendientes, tasas relativas del nivel del mar, tipos de costa, altura media de las olas, zonas de protección y zonas de erosión. La asignación de pesos de cada variable se efectuó mediante el análisis multicriterio y se planteó el índice de vulnerabilidad costera (CVI) el cual se calculó mediante algebra de mapas, operando la raíz cuadrada del producto de las variables dividido por el total de las variables.	Se encontró que el CVI presenta unos valores más altos en su mayoría por factores asociados a la topografía, siendo la variable con mayor incidencia en la zonificación.

Fuente: Elaboración propia

## 3. Metodología

La metodología comprende tres fases, las cuales corresponden al cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados: 1) Desarrollo de la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental usando el enfoque de sensibilidad, exposición y resiliencia, que abarca desde la identificando las variables asociadas a cada componente así como la aplicación de un modelo multicriterio de evaluación; 2) Aplicación de la metodología en el Complejo de Páramos del Pisba, usando información ambiental, social y económica y técnicas espaciales de acuerdo al conjunto de datos y procedimientos; y 3) Análisis de patrones espaciales de la vulnerabilidad ambiental en el ecosistema de páramo para determinar las zonas prioritarias de gestión. La Figura 3-1 esquematiza el proceso metodológico.

### 3.1 Desarrollo de la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo.

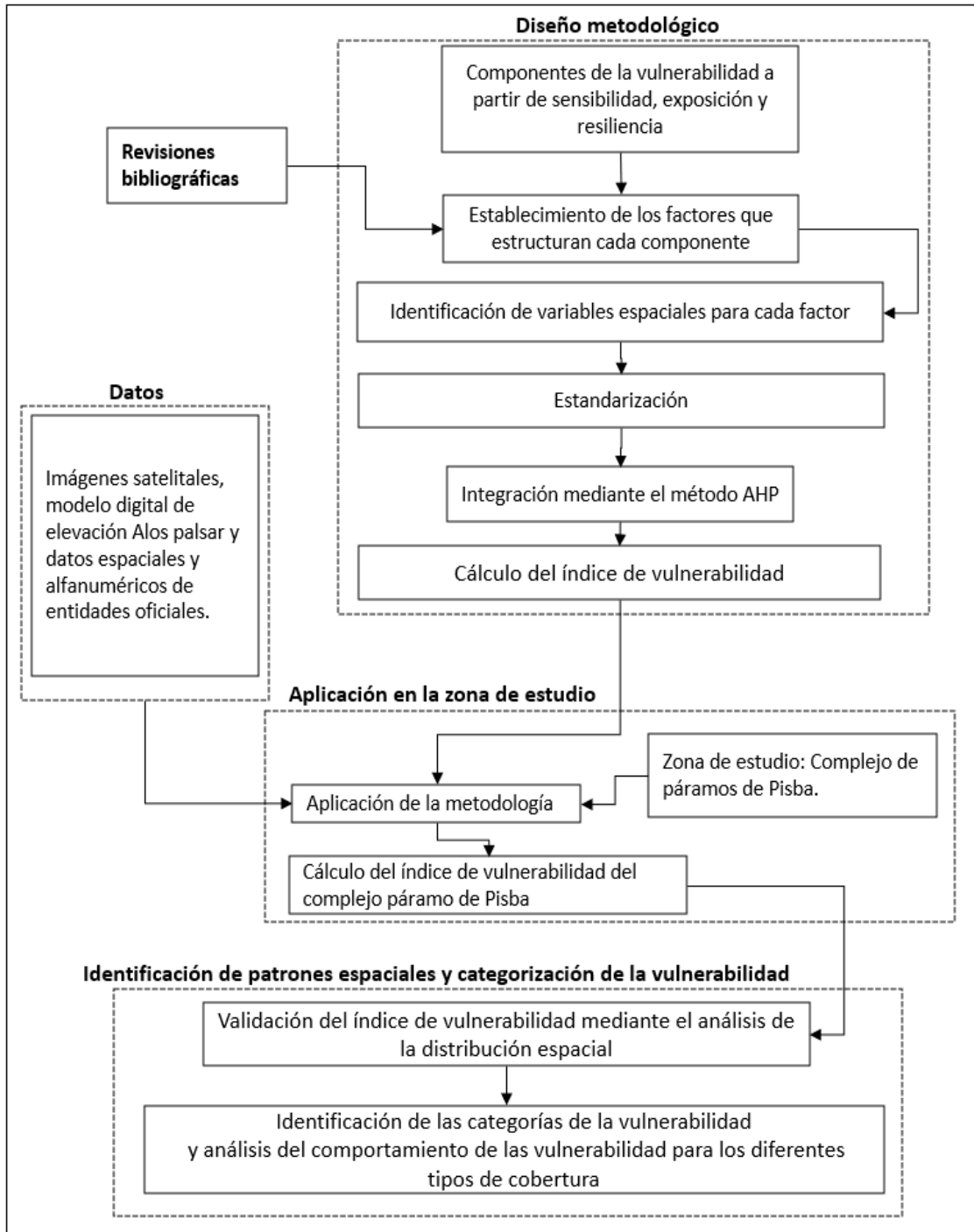
A partir de una revisión bibliográfica sobre el tema, se identificaron los factores asociados a la vulnerabilidad ambiental y de la cobertura vegetal en diferentes estudios, tomando como referencia la evaluación de los componentes de la vulnerabilidad ambiental para la sostenibilidad propuesto por (Turner et al. 2003) y que se adapta a este tipo de estudios (De Lange et al. 2010). Se propuso una metodología bajo el marco de sensibilidad exposición y resiliencia, los cuales se define a continuación:

- **Sensibilidad:** Refleja las características o componentes propios del ecosistema que tienen potencial para ser afectados por una presión determinada (Liao et al. 2013). Es decir, establece el potencial de afectación que pueden llegar a sufrir diferentes ecosistemas basándose en sus condiciones bióticas y abióticas.

- **Exposición:** Se asocia a indicadores que reflejan los posibles disturbios, así como las características propias del entorno que pueden generar un impacto directo al ecosistema.(Liao et al. 2013). Estos factores están asociado a presiones antrópicas tales como crecimiento poblacional y cambio de cobertura y uso del suelo (Moizo Marrubio 2004).
- **Resiliencia:** Factores que reflejan la capacidad de resiliencia, así como las acciones que se toman para conservar el ecosistema (Omann et al. 2009); estos factores en su mayoría están asociados a zonas de protección y conservación, debido a que dichas zonas no se han intervenido y no se ha alterado la estructura y funciones propias del sistema (IDEAM 2012).

Este marco es de carácter sistémico y parte del consenso que asocia la vulnerabilidad con el acoplamiento y dinámica a diferentes escalas espaciales del ser humano y las amenazas sobre el sistema ambiental, indicando que el análisis de la vulnerabilidad debe ser integral. La arquitectura básica está compuesta por: i) vínculos del hombre y las condiciones y procesos biofísicos (ambientales), ii) perturbaciones y estresores que surgen de estas condiciones y procesos y iii) el sistema acoplado humano-ambiental de preocupación incluida a exposición y respuestas (Figura 3-2).

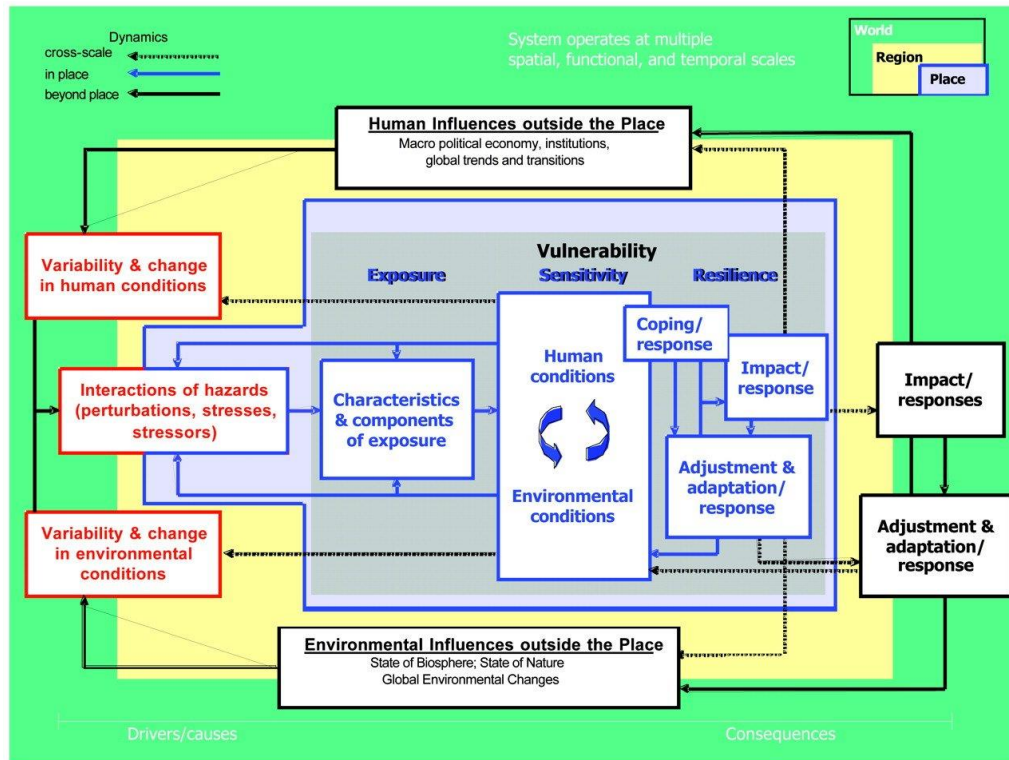
**Figura 3-1:** Esquema metodológico para zonificar la vulnerabilidad en ecosistemas de páramo: caso de estudio complejos de páramos de Pisba.



Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3-2:**Marco de trabajo de la vulnerabilidad ambiental. Componentes identificados a escala local y su relación con otras escalas

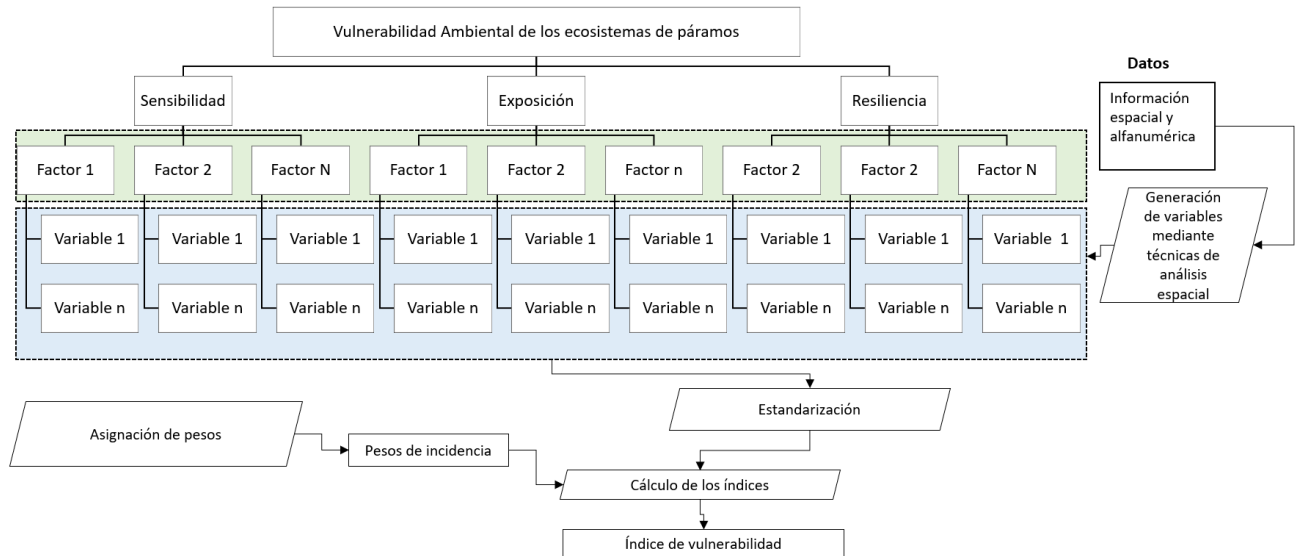


Fuente: Tomando de (Turner et al., 2003)

La propuesta metodológica parte del análisis de los componentes de la vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y resiliencia, combinando métodos de análisis espacial partiendo de la disponibilidad de la información a nivel nacional y regional que corresponde a una escala de trabajo de 1:25.000 y análisis de decisión multicriterio, para al final proponer un índice de vulnerabilidad ambiental del ecosistema de páramos frente a usos del suelo. Dentro de la propuesta se definieron los factores como aquellos grandes grupos que reflejan elementos de índole biofísica, social o económica que se asocian y pueden explicar cada componente y las variables o índices como aquellos atributos específicos que ayudan a caracterizar cada factor.

La Figura 3-3, presenta el esquema metodológico propuesto para alcanzar el primer objetivo, siguiendo la metodología propuesta por He et al (2018), el cual se describe a continuación.

**Figura 3-3:**Flujograma para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental (Adaptado de He et al., 2018)



Fuente: *Elaboración propia.*

- (1) Selección y descripción de los factores por cada componente: a partir de revisión bibliográfica y consulta con expertos que trabajan sobre vulnerabilidad ambiental y páramos, se seleccionaron un conjunto de factores que pueden incidir en este ecosistema.
- (2) Selección de índices o variables por cada factor: se seleccionaron índices representativos trabajados y calculados con una resolución de ráster de 30 metros asociados a una escala de 1:25.000. Estos índices han sido usados o propuestos para ecosistemas naturales y páramos y ayudan a caracterizar cada componente propuesto, indicando su método de cálculo y fuente de información.
- (3) Normalización de atributos de vulnerabilidad ecológica: con el fin de comparabilidad entre las variables se propuso efectuar procesos de normalización en una escala adecuada al comportamiento de los datos incluidos en el análisis. Para este paso se hizo uso de procedimientos y técnicas espaciales.
- (4) Determinación de pesos mediante análisis multicriterio: el multicriterio es una herramienta para la toma de decisiones que permite descomponer un problema complejo como es la vulnerabilidad en una estructura jerárquica. Se propuso aplicar la técnica AHP y consulta de expertos para determinar los pesos de cada variable.

- (5) Cálculo del índice de vulnerabilidad: consistió en calcular el índice general de vulnerabilidad, basado en los pasos anteriores y el uso de SIG para operaciones algebraicas.

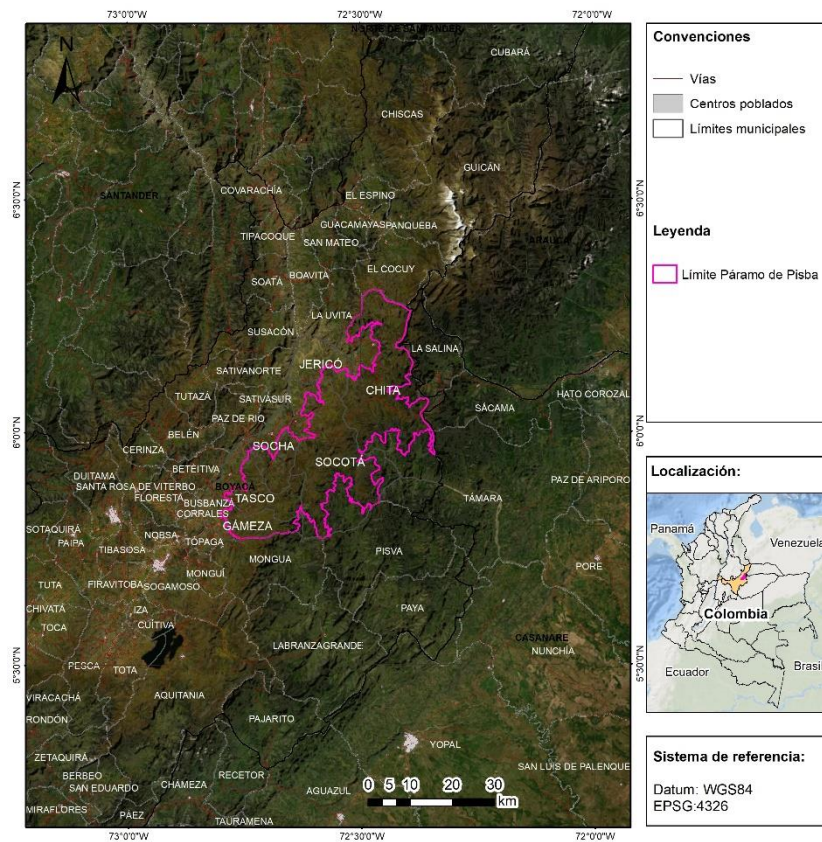
## **3.2 Evaluación la metodología propuesta mediante su aplicación en el complejo de páramos de Pisba (Boyacá, Colombia).**

### **3.2.1 Área de estudio**

El área de estudio corresponde al complejo de páramos de Pisba delimitado por (Morales et al. 2007), el cual está ubicado sobre la cordillera Oriental colombiana. sobre los municipios Chinita, Gámeza, Jericó, Socha y Socotá (Departamento de Boyacá) y los municipios de Sácama y Támara (Departamento de Casanare). La extensión es de 81.482 ha, de las cuales el 26% están dentro del Parque Nacional Natural Pisba declarado en el año 1977 (Morales et al. 2007). El complejo Pisba se localiza entre los 3.100 y los 4.100 metros sobre el nivel del mar 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 y 6,5 ° C. El relieve es complejo, conformado por laderas suaves y escarpadas, lomas, colinas crestas y crestones, con suelos con presencia alta de materia orgánica. A nivel de vegetación es posible identificar, diferentes asociaciones vegetales representadas por frailejones pajonales, chuscales, frailejonales, romerales y árnica y musgos. Respecto a la fauna se destaca la avifauna de especies de colibríes así como águilas de páramo y entre los mamíferos presentes se encuentran los cusumbos, venados y el oso andino (Morales et al. 2007).

El complejo además de ser importante ambientalmente, posee importancia social y cultural, debido a que abastece de recurso hídrico a unas 130.000 personas, en los departamentos de Boyacá y Casanare. Entre las actividades económicas presentes, 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 (Osorio Fernández 2015; Morales et al. 2007; Meneses Moreno et al. 2006). Sin embargo, en los últimos 20 años se ha incrementado la actividad minera debido al otorgamiento de títulos mineros sobre este ecosistema, siendo el segundo páramo con más títulos mineros otorgados después de Santurbán (Osorio Fernández 2015).

Figura 3-4: Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con base en información IGAC e Instituto Humboldt (2012).

### 3.2.2 Aplicación de la metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental

La evaluación de la metodológica (Figura 3-3), se aplicó en el complejo de páramos de Pisba, calculando y espacializando los factores y variables propuestos, con base en a las particularidades del ecosistema, acorde con lo planteado por (De Lange et al. 2010) quien manifiesta que las metodologías de análisis de vulnerabilidad deben estar estructuradas para una aplicabilidad en ecosistemas con condiciones similares. La información para cada variable propuesta, se consultó de diversas fuentes de datos provenientes en gran parte de información oficial y de acuerdo a sus características se propusieron técnicas de análisis espacial, tales como: interpolaciones, clasificación supervisada, cálculo de indicadores a partir de imágenes satelitales, análisis de distancias euclidianas y espacialización de datos alfanuméricos, obteniendo las diferentes capas de información a

las cuales fueron transformadas, ajustadas y rasterizadas con una resolución de 30 metros, lo cual podría asociarse a una escala de 1:25.000. La aplicación de la metodología se generó a nivel local, teniendo en cuenta la sensibilidad, exposición y resiliencia basado en (Turner et al. 2003) para facilitar su replicabilidad en otros complejos de páramos. A continuación, se sintetiza los insumos principales para abordar cada componente de la vulnerabilidad:

A nivel de sensibilidad, asociada a características biofísicas de los ecosistemas, se propone como insumo principal la elaboración del mapa de coberturas, el cual es un insumo indispensable en estudios de vulnerabilidad (Malekmohammadi & Jahanishakib 2017; Nandy et al. 2015; Song et al. 2010). El Mapa de las coberturas del suelo, se elaboró para el año 2020, con la información proveniente de la colección USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance, y procesadas en Google Earth Engine (GEE), previa aplicación de procesos de fusión con el fin de eliminar los pixeles que contenían nubes usando GEE con un periodo de 2 meses, entre 01/02/2020 y 30/03/2020. Para su elaboración, se realizó una clasificación supervisada empleando el algoritmo Random Forests (RF) (Breiman 2001) del paquete de algoritmos *Supervised Classification* disponibles en GEE con un total de 60 árboles, utilizando únicamente datos de bandas espectrales (Ver tabla 3-1) sin la inclusión de índices espaciales como NDVI o BSI. Se usaron 300 puntos de muestreo obtenidos de la información de usos del suelo proveniente del IDEAM para el año 2018 escala 1:100.000; estos puntos fueron validados uno a uno para identificar que dichas coberturas referenciadas no tuvieran cambios a 2020, adicionalmente se usaron 20 puntos de muestreo, evaluados visualmente mediante la observación de las imágenes satelitales en verdadero color. Del total 260 muestras se usaron como puntos de entrenamiento del algoritmo y las 60 restantes como puntos de validación para calcular el índice Kappa.

**Tabla 3-1: Características de las bandas de Landsat 8**

Banda	Descripción	Resolución	Longitud de onda
2	Azul	30 metros	0.45 - 0.51 $\mu\text{m}$
3	Verde	30 metros	0.53 - 0.59 $\mu\text{m}$
4	Rojo	30 metros	0.64 - 0.67 $\mu\text{m}$
5	Infrarrojo cercano (NIR)	30 metros	0.85 - 0.88 $\mu\text{m}$

6	Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	30 metros	1.57 - 1.65 $\mu\text{m}$
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	30 metros	2.11 - 2.29 $\mu\text{m}$

Fuente: *Elaboración propia.*

Adicionalmente para el componente de sensibilidad se consideraron variables asociadas a la topografía, preferiblemente usó del DEM del satélite ALOS de la agencia espacial japonesa (JAXA), así como datos de variable climáticas provenientes del IDEAM como entidad oficial.

Para la exposición, se propone evaluar los factores que presentan una mayor presión sobre el ecosistema de páramo (natural como antrópica). Su identificación partió de la incidencia generalmente en actividades productivas e infraestructura sobre las diferentes coberturas y usos del suelo como lo establece (De Lange et al. 2010). Las fuentes de información relacionadas comprendieron el mapa de cobertura e información base proveniente del IGAC, DANE y POD (Plan de Ordenamiento Departamental).

A nivel de Resiliencia, se consideraron las zonas de protección, así como la integridad y capacidad de recuperación del ecosistema siguiendo lo planteado por (Yi & Jackson 2021). Los datos provienen de fuentes oficiales relacionadas con el SINAP (Sistema Nacional de áreas protegidas) y específicamente para evaluar la recuperación se propone la utilización de análisis multitemporales.

Finalmente, para evaluar los pesos de cada factor y variable, se consultó a expertos tanto en el tema de vulnerabilidad de alta montaña como de páramos, quienes mediante una consulta técnica calificaron las matrices propuestas, con las cuales se generó el índice de vulnerabilidad.

### **3.3 Análisis de patrones espaciales de la vulnerabilidad ambiental en el ecosistema de páramo para determinar las zonas prioritarias de gestión.**

Una vez aplicada la metodología propuesta, se verificó la distribución espacial del índice de vulnerabilidad, por medio de la herramienta *High/Low Clustering (Getis-Ord General G)*, identificando si los parches de vulnerabilidad presentan distribuciones aleatorias, dispersas

o clúster, mediante la identificación de valores altos y bajos, La estadística espacial de  $G$  está determinado por:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i x_j}, \forall j \neq i$$

Donde  $w_i$  y  $w_j$  son los valores de atributos para los pixeles  $i$  y  $j$ , y  $w_{i,j}$  es el peso espacial para las cada  $i$  y  $j$ .  $n$  es el número de pixel y  $\forall j \neq i$  es el indicador que  $i$  y  $j$  no pueden ser el mismo pixel.

Una vez establecida la distribución espacial, se procedió a mapear los clústeres, mediante la herramienta *Hot Spot Analysis (Getis-Ord  $G_i^*$ ) (Spatial Statistics)* de ArcGIS, la cual determina la agrupación espacial de los valores altos y bajos, mediante el método *Getis-Ord  $G_i^*$* , el cual está determinado por:

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

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.

El valor obtenido genera un índice de correlación espacial por pixel, que identifica Hot spot y Cold Spot con niveles de confianza de 95%. Con esta zonificación de clúster, se delimitaron las zonas de vulnerabilidad, tomando como categoría alta los Hot Spot con nivel de confianza superior al 95% y la vulnerabilidad baja los Cold Spot con un nivel de confianza superior a 95%, para la categoría media se tomaron las zonas de no significancia.

Finalmente se calcularon las áreas de cada categoría a nivel de cobertura y municipios, para poder establecer las zonas más afectadas y la distribución espacial en el área de estudio.

## **4. Resultados**

### **4.1 Desarrollo de la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo.**

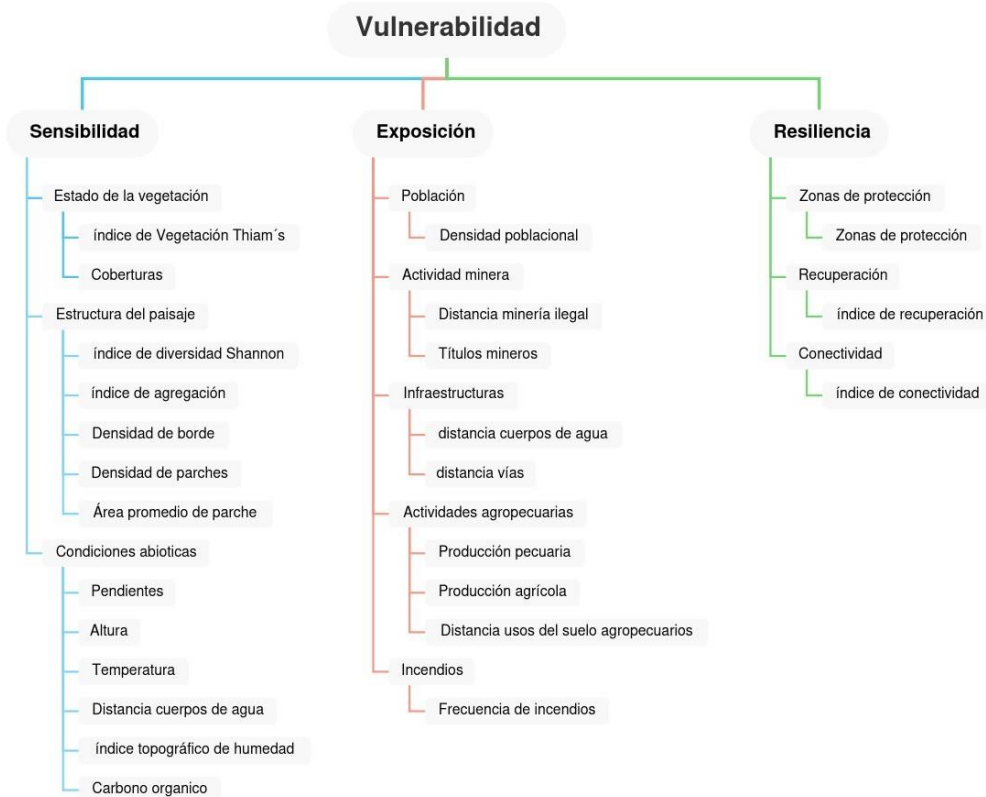
A continuación, se presenta la propuesta detallada junto con su aplicación al Complejo de páramos de Pisba.

#### **4.1.1 Selección y descripción de factores y variables asociadas a la vulnerabilidad ambiental y su aplicación al Complejo de páramos de Pisba**

Se propuso un total de 9 factores trabajados mediante ráster con un tamaño de pixel de 30m lo cual equivale a una escala de 1:25.000, relacionados con la vulnerabilidad, los cuales se estructuraron a partir de variables ambientales, sociales y económicas identificadas, que reflejan su incidencia sobre la cobertura vegetal, especialmente referentes a los usos del suelo. Se tuvo en cuenta la disponibilidad y calidad de información y su posibilidad de espacialización para efectos de análisis. Para cada uno de los componentes se usó diferentes técnicas de análisis espacial para espacializar las variables. La Figura 4-1, resume los factores seleccionados en cada componente.



**Figura 4-1:** Factores seleccionados para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la cobertura del suelo a nivel de componentes



*Fuente: Elaboración propia.*

**Sensibilidad:** Para el establecimiento de los factores de sensibilidad se tuvieron en cuenta las características propias del ecosistema que pueden llegar a ser afectadas por determinadas presiones o condiciones que generen una mayor probabilidad de impactos (Bourgoin et al. 2020). Para este componente se plantearon tres factores: estado de la vegetación, estructura del paisaje y condiciones abióticas del ecosistema, estructurados en doce variables. El estado de la vegetación, ayuda a identificar la distribución de las coberturas del suelo, su estado y estructura (De Lange et al. 2010); la estructura del paisaje determina la configuración del paisaje en términos de las características del ecosistema de páramos, sin tener en cuenta algunas métricas orientadas a evaluar procesos de fragmentación del ecosistema (Duguay et al. 2012). Las variables asociadas a las condiciones abióticas indican las características formadoras del ecosistema de estudio (De Lange et al. 2010).

La clasificación propuesta para el complejo de páramos del Pisba usando *Random Fores*, se presenta en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1: Descripción de las coberturas del suelo identificadas para el Complejo de Páramos de Pisba**

Cobertura	Definición
Vegetación paramo	Agrupar las coberturas de vegetación herbácea y arbustiva correspondientes al páramo y subpáramo.
Bosque	Contiene las coberturas de bosque andino y alto andinos
Pastos y cultivos	Contiene las coberturas asociadas a los territorios agrícolas y pecuarios
Plantaciones forestales	Corresponde a las coberturas de plantación forestal generalmente de pino y eucalipto
Cuerpos de agua	Contiene todas las superficies de agua, incluyendo turberas, lagunas galciaras
Suelo desnudo	Corresponde a las áreas abiertas o con poca vegetación sobre afloramientos rocosos.

Fuente: *Elaboración propia.*

Adicionalmente, se propuso el uso de modelos digitales de elevación (DEM) del satélite ALOS de la agencia espacial japonesa (JAXA), con una resolución de espacial de 12,5, para establecer variables biofísicas y sobre el nivel del mar y el uso del método Co-Kriging para variables como temperatura. A continuación, se presentan los factores correspondientes a cada subcomponente y los métodos espaciales para su obtención (Tabla 4-2).

**Tabla 4-2: Descripción y métodos de obtención de las variables asociadas a los factores de sensibilidad**

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
Estado de la vegetación: importante para determinar las condiciones y característica	Índice de vegetación transformado Thiam's	Calcula el verdor de la vegetación, permitiendo mejor diferenciación de tipos de vegetación (Juzga 2016). Evalúa el estado de salud de las coberturas	Se calculó con las bandas infrarrojo e infrarrojo cercano de la imagen Landsat en GEE a partir imágenes de Landsat 8 2020	$TTVI = \sqrt{ABS(ndvi + 0,5)}$ (Eastman 2012)

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
s de la vegetación actual, la cual directamente es afectada por los disturbios en los páramos (Vargas 2013)		en términos a su vigor fotosintético.	con resolución 30 metros.	
	Tipo de cobertura del suelo	Indica el tipo de coberturas del suelo presentes en el área de estudio.  Ayuda a determinar la vulnerabilidad a partir de las condiciones de cobertura natural o antrópica establecida mediante algoritmos de clasificación supervisadas (Choudhary et al. 2018)	Obtenido a partir de la aplicación de Random Forest usando Landsat 8, 2020 con una resolución de 30 metros y Google Earth Engine.	Random Forest (Breiman 2001)
Estructura del paisaje: Características propias del paisaje en términos de composición y configuración espacial que indican el estado de conservación o fragmentación del área de estudio, identificando zonas con	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 al. 2020). Indica la heterogeneidad u homogeneidad del paisaje	Mapa de coberturas del suelo y cálculo del índice de diversidad con tamaño de pixel de 30 m	$AI = 1 + \frac{[(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{i,j})]}{2 \ln(n)}$ (Bourgoin et al. 2020).
	Índice de agregación (AI)	Grado de agregación por clases del paisaje. Definido como el número coberturas naturales por clase, sobre el número total coberturas para todo el		$\frac{\sum \text{Cobertura natural}}{\text{Total de coberturas}}$ (Bourgoin et al. 2020).

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
condiciones que generan una mayor vulnerabilidad (Bourgoin et al. 2020)		paisaje (He et al. 2001). Ayuda a identificar la presencia o ausencia de parches de cobertura natural en la grilla de análisis.		
	Densidad de borde (ED)	Suma de longitudes de todos los segmentos del paisaje, sobre el área total del paisaje (Bourgoin et al. 2020). Ayuda a identificar la distribución y forma de los parches de coberturas, facilitando la identificación de parches más expuestos a cambios por cobertura del suelo más vulnerables.		$\frac{\sum \text{Segmentos de borde (m)}}{\text{Total del área (m}^2\text{)}} \text{ (Bourgoin et al. 2020).}$
	Área promedio de parche (MPA)	Establece el área promedio de los parches identificados por cada clase de cobertura (Bourgoin et al. 2020). Identifica el tamaño de parches naturales, indicando que los parches de coberturas naturales con menor área presentan una mayor vulnerabilidad.		$\frac{\sum \text{área del parche (m}^2\text{)}}{\text{Total de parches}} \text{ (Bourgoin et al. 2020).}$
	Densidad de parches (PD)	Describe la densidad de los parches en relación a su número por área (Bourgoin et al. 2020). Identifica la densidad de cobertura natural en el área de análisis, determinando la		$\frac{\sum \text{Número de parches}}{\text{Área total}} \text{ (Bourgoin et al. 2020).}$

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/ pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
		concentración o fragmentación de parches respecto a la vulnerabilidad.		
Condiciones abióticas del ecosistema. Determina las características propias de los páramos como temperatura, disposición de carbono y topografía, las cuales determinan las condiciones del ecosistema de análisis y su relación con procesos como la regulación y abastecimiento de recursos hídricos y contenido de carbono en suelos, servicios ecosistémico más sensible al cambio de uso del suelo en los páramos (Cabrera &	Pendientes	Determina el cambio de Z respecto a un plano (X, Y) (Lollino et al. 2015). Permite diferenciar las zonas de alta y baja pendiente y relacionarlas con una mayor sensibilidad al cambio de uso del suelo.		$P = ATAN \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \frac{180}{\pi}$ (Lollino et al. 2015)
	Altura	Corresponde a las elevaciones con respecto a nivel del mar. Permite analizar bajo que condiciones altitudinales se encuentran la vegetación de páramo y su posibles limitaciones ambientales relacionadas con cambios en la cobertura del suelos (Garavito et al. 2018)	Se usó el DEM ALOS PALSAR, 2011 con una resolución de 12,5 m homologado a 30 m	$msnm$
	Temperatura	Refleja la temperatura media del aire a lo largo de un año. Identifica las zonas donde la temperatura es un factor limitante para que se presenten cambios de la cobertura en ecosistemas adaptados a ambientes fríos como los páramos (IDEAM 2012)	Interpolación con Co-Kriging de datos de estaciones meteorológicas IDEAM 2019 y el DEM ALOS PALSAR, 2001 con una resolución de 12,5 m	$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_j Z(S_i)$ (Li & Heap 2008).

54 Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
Ramírez 2014)	Área de amortiguamiento de los cuerpos de agua	Describe el área de amortiguamiento de los diferentes humedales y ríos presentes en el páramo, dado que los cuerpos de agua uno de los más afectados por cambios de usos del suelo, lo cual refleja una mayor sensibilidad a su capacidad de regulación hídrica (Calvo González 2006)	Cartografía base del IGAC, escala 1:25.000. Análisis de distancia euclidiana.	$d(a,b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (xb - xa)^2}$ (ESRI 2016)
	Índice topográfico de humedad	Corresponde a las áreas potencialmente almacenadoras de humedad o zonas de acumulación de agua. Esta métrica permite identificar las zonas más vulnerables debido a su capacidad de almacenamiento de recurso hídrico, el cual es uno de los principales servicios ecosistémicos prestados por el páramo (Valencia et al. 2020)	Se calculó mediante DEM ALOS PALSAR, 2011 con una resolución de 12,5 metros, identificando la acumulación de flujo, área de captación específica y las pendientes la capa fue homologada a 30m.	$TWI = LN\left(\frac{SCA}{\tan \theta}\right)$ (Mattivi et al. 2019)
	Carbono Orgánico	Refleja el contenido de carbono orgánico del suelo hasta 30 cm de profundidad. Indica la capacidad de	Mapa de stock de carbono orgánico IGAC, con una resolución de pixel de 100m. se ajustó	<i>Kriging Simple</i> (Li & Heap 2008).

Factor/pertinencia	Variable	Descripción/pertinencia	Método de obtención/ Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
		acumulación del carbono en los suelos de páramos y su respuesta frente a cambios de uso del suelo. Este índice se considera importante para evaluar la vulnerabilidad del ecosistema en términos de ciclos globales de carbono y cambio climático, dado su lenta recuperación en los páramos(Vargas 2013)	la escala a una resolución de 30 metros mediante Interpolación con Kriging simple	

*Fuente: Elaboración propia.*

### Exposición

La exposición refleja los posibles disturbios, así como las características propias del entorno del ecosistema que pueden generar un impacto directo sobre la cobertura vegetal (Bourgoin et al. 2020). Para este componente se propusieron 5 factores, los cuales están compuestos por 9 variables. Se identificaron las estructuras antrópicas tales como vías, cultivos, construcciones y accesibilidad como importantes, cuya información fue extraída de las bases oficiales del IGAC, CORPOBOYACÁ y POD Boyacá. Cada variable fue obtenida mediante procesos espaciales, generalmente distancias euclidianas usando ArcGIS versión 10.8 con la extensión Network Analyst. Lo anterior debido a que establecer las áreas de influencia para las diferentes variables de exposición es un proceso fundamental a la hora de predecir futuros impactos (Gomarasca 2010), por lo cual un análisis de cercanía se convierte en herramienta importante en la predicción de futuros cambios de uso del suelo asociado a actividades antrópicas (Bocco et al. 2001).

Los factores de poblacionales y de actividades agropecuarias fueron establecidos mediante la construcción de variables usando información del portal REDATEM del Departamento Nacional de Estadística (DANE) (<http://systema59.dane.gov.co/>), que consiste en información sobre población y densidad de población a nivel rural y datos de

producción agropecuaria. Estas variables se espacializaron a nivel de veredas. A continuación, se plantean los factores y su método de obtención para el componente de exposición (Tabla 4-3).

**Tabla 4-3: Descripción y métodos de obtención de las variables asociadas a los factores de exposición.**

Factores	Variables	Descripción	Método de obtención/Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
Población. El crecimiento demográfico es un impulsor indirecto de cambio en los ecosistemas y de pérdida de su funcionamiento.	Densidad poblacional	Describe el número de personas que habitan una zona por hectárea. Esta variable es uno de los principales factores detonantes en los impactos en los diferentes ecosistemas (Li et al. 2006)	Procesos de join a nivel de veredas con la información de REDATAM (DANE, 2018).	$\frac{\text{Total de población rural}}{\text{Área (ha)}}$ <p>(DANE, 2018)</p>
Actividad minera. La minería es la actividad económica con mayor impacto sobre los ecosistemas de páramo, causando daños irreversibles en el mismo (Vargas 2013)	Distancia minería ilegal	Describe la distancia a zonas de explotación de minería ilegal, Esta variable es determinante en la exposición sobre los páramos, en el páramo de Pisba se presenta de manera recurrente la explotación ilegal de carbón, siendo una de las principales problemáticas (Osorio Fernández 2015).	Distancia euclidiana mediante ArcGIS a partir de puntos de minería ilegal del POD Boyacá 2018 escala 1:25.000.	$d(a,b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (xb - xa)^2}$ <p>(ESRI 2016)</p>
	Títulos mineros	Describe la distancia a los títulos mineros vigentes. Ayuda a determinar las zonas en las que se genera o se pueden llegar a generar actividades de explotación minera, la cual representa un	Asignación de un valor de 1 para zonas con títulos y 0 para zonas sin títulos a partir de información de Títulos mineros del IGAC 2017 1:25.000.	<p><i>Binario: 0 y 1</i></p>



Factores	Variables	Descripción	Método de obtención/Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
		impacto significativo sobre el ecosistema (Osorio Fernández 2015).		
Infraestructura urbana y vial. Están asociadas a los cambios de usos del suelo presentes en los ecosistemas al ser puntos de ingreso de población y desarrollo agropecuario (Pei et al. 2015)	Distancia centros poblados	Describe la distancia euclidiana a los centros poblados; permite identificar el área de influencia y de posibles impactos por actividades económicas en el páramo.	Distancia euclidiana a partir de Centros poblados de la base cartográfica del IGAC 2020, escala 1:25.000	$d(a,b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$ (ESRI 2016)
	Distancias vías	Describe el área de influencia de vías principales, secundarias y terciarias: esta variable está ligada al avance de la frontera agrícola así como a la explotación minera (Cabrera & Ramírez 2014)	Distancia euclidiana a partir de vías tipo 1, 2,3 y 4 de la base cartográfica del IGAC 2020, escala 1:25.000.	$d(a,b) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2}$ (ESRI 2016)
Actividades agropecuarias. Este factor es uno de los factores directos de cambio en la cobertura y uso del suelo en los ecosistemas (Yi & Jackson 2021)	Producción pecuaria	Describe la producción de cabezas de ganado por hectárea. Permite identificar las veredas mayormente afectadas por la ganadería como actividad impulsora de cambio de la cobertura del suelo.	Datos de REDATAM, para el censo agropecuario 2018 del DANE 2018 y join a nivel de veredas DANE.	$\frac{\text{Cabezas de ganada}}{\text{Área (ha)}}$ (DANE, 2018)
	Producción agrícola	Describe las hectáreas sembradas por vereda. La variable identifica las veredas con mayor producción agrícola y por ende las más expuestas a posibles impactos por cambio de cobertura y uso del suelo.		$\frac{\text{Hectáreas sembradas}}{\text{Área (ha)}}$ (DANE, 2018)
	Distancia Usos del	Indica el área de influencia de los usos del		Distancia euclidiana de la

Factores	Variables	Descripción	Método de obtención/Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
	suelo agropecuarios	suelo agropecuarios; permite establecer las zonas con posible avance de la frontera agropecuaria debido a la cercanía con cultivos y ganado.	clase de pastos y cultivos del Mapa de coberturas del suelo con una resolución de 30 metros.	(ESRI 2016)
Incendios. La identificación de los incendios es una de los disturbios presentes en el páramo (Vargas 2013), fundamental para la identificación y zonificación de los mismos para evaluar la vulnerabilidad.	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 30x30 metros.	$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ $\Delta NBR = NBR(\text{Prefire}) - NBR(\text{postfire})$ (Yi & Jackson 2021)

Fuente: Elaboración propia.

### Resiliencia.

Los factores de resiliencia reflejan las características propias del ecosistema para recuperarse o hacer frente a posibles presiones y están asociadas con su integridad ecológica. Se consideró los factores de protección y conservación, como parte de este componente, dado que allí se mantiene las funciones propias del sistema, siendo la resiliencia alta (IDEAM 2012). Adicionalmente se identificaron cambios en el índice de vegetación para establecer la capacidad de recuperación del ecosistema y la conectividad de la cobertura vegetal, como una medida de continuidad de los procesos ecológicos

asociados al área de estudio. En la tabla 4-4 se presenta el detalle de las variables, con la descripción, posible fuente de información y algoritmo o ecuación.

**Tabla 4-4:** Descripción y métodos de obtención de las variables asociadas a los factores de resiliencia.

Factores	Variables	Descripción	Método de obtención- Fuente asociada al Complejo de páramos de Pisba	Ecuación/Algoritmo
Figuras de protección. Representan instrumentos legales que tienen por objetivo mantener la integridad de los ecosistemas frente a impulsores de cambio como el cambio de la cobertura y uso del suelo.	Figuras de protección nacional, regional o local	Indica las figuras de protección existentes para la conservación de los ecosistemas. Esta variable es importante debido a que en las zonas protegidas se mantiene las funciones propias del sistema, siendo la resiliencia alta (IDEAM 2012)	Identificación de las distintas zonas de protección y asignación de valores a partir de SINAP y POD Boyacá 2018.	<p style="text-align: center;"><i>Nacional: 1</i> <i>Regional: 0,5</i> <i>Sin protección 0</i></p>
Recuperación de ecosistemas. Factor proxy sobre la resiliencia del ecosistemas que indica su capacidad de volver a estados iniciales.	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 & Jackson 2021). Esta variable es fundamental a la hora de evaluar la vulnerabilidad, ya que establece la capacidad de recuperación del ecosistema (Yi & Jackson 2021).	Calculó del índice de vegetación normalizado Thiam`s para el periodo 1999 a 2020 usando imágenes Landsat 5 Y 8 con una resolución de 30 metros y aplicación de un indicador asociado a la tasa de recuperación, las zonas que presentaron recuperación o se mantuvieron sin cambio del NDVI son	$\frac{\Delta(NDVI\ 2020 - NDVI\ 1999)}{NDVI\ 1999}$ <p style="text-align: center;">(Yi &amp; Jackson 2021)</p>

			cercanas a 1, mientras que las zonas transformadas en su totalidad tienen valores cercanos a 0.	
Conectividad. Proceso a nivel de paisaje que busca mantener el flujo de procesos ecológicos	Conectividad	Establece el índice de conectividad de las coberturas vegetales naturales, a partir del análisis de vecindades (Riitters et al. 2000). Esta variable es importante a la hora de determinar las funciones ecosistémicas, siendo estas las que determinan una mayor o menor vulnerabilidad (Riitters et al. 2000).	Se usó el Mapa de cobertura del suelo del año 2021 con una resolución de 30 metros y un análisis de conectividad en SAGA GIS, mediante la identificación de los pares de pixel de cobertura natural respecto a una grilla de análisis de 3x3 pixel.	$\frac{\sum \text{Pares con ambos pixel de cobertura natural}}{\sum \text{Pares con al menos un pixel de cobertura natural}}$ <p>(Riitters et al. 2000)</p>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Normalización de variables

Se propone que las variables se estandaricen por cada factor identificado, usando un índice de 0 a 1 y aplicando dos técnicas principales: 1) para las capas de información que presentaban datos continuos (22 variables), se usó Lógica Difusa, a partir del método Signomial, debido a que presentan cambios más suaves en los límites, usando el software Terrset y partiendo de valores de cortes iniciales y finales (A, C) o (B, D), estableciendo si eran crecientes o descendientes, 2) Las restantes 3 variables corresponden a datos categóricos y se clasificaron de 0 a 1, asignando un valor de 0 para categorías con menor sensibilidad, exposición o resiliencia y de 1 para categorías con mayor sensibilidad, exposición y resiliencia. La Tabla 4-5 muestran los métodos y valores de estandarización para cada variable con énfasis en el complejo de páramos de Pisba. Finalmente, todas las variables fueron espacializadas mediante el uso de ArcGis versión 10.6, para efectos de la presentación de los resultados se agruparon las variables en tres rangos iguales: valores bajos (0-0,33), valores medios (0.34-0.66) y valores altos (0.67-1) con los cuales se calcularon las áreas de aporte para cada variable.

**Tabla 4-5: Estandarización de variables asociadas a la vulnerabilidad ambiental del Complejo de Páramos de Pisba (Boyacá).**

Componente	Factor	Variable	Método	Función	Corte inicial	Corte final	
Sensibilidad	Estado de la vegetación	Índice de vegetación transformado Thiam's	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	1	
		Tipo de Coberturas del suelo	Asignación de valores	Cuerpos de agua: 0, Vegetación de paramo: 0.3, Bosque: 0.5, Plantaciones forestales: 0.6, Pastos y cultivos: 0.9, Suelo desnudo:1	-	-	
	Estructura del paisaje	Índice de diversidades Shannon	Lógica difusa	Signomial creciente	1	4,8	
		Índice de agregación (AI)	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	100	
		Densidad de borde (ED)	Lógica difusa	Signomial creciente	0	100	
		Área media de parche	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	4100	
		Densidad de parches (PD)	Lógica difusa	Signomial creciente	0	1	
	Condiciones abióticas del ecosistema	Pendientes	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	45	
		Altura	Lógica difusa	Signomial decreciente	2500	3400	
		Temperatura	Lógica difusa	Signomial creciente	9	12,5	
		Área de amortiguamiento de los Cuerpos de agua	Lógica difusa	Signomial creciente	0	30	
		Índice topográfico de humedad	Lógica difusa	Signomial creciente	0	20	
		Carbono Orgánico	Lógica difusa	Signomial creciente	60	133	
	Exposición	Población	Densidad poblacional	Lógica difusa	Signomial creciente	0	1,2
		Actividad minera	Distancia minería ilegal	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	1500
títulos mineros			Asignación de valores	-	-	-	
Infraestructuras		Distancia centros poblados	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	2000	
		Distancia vías	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	300	

Componente	Factor	Variable	Método	Función	Corte inicial	Corte final
	Actividades agropecuarias	Producción pecuaria	Lógica difusa	-	0	0,7
		Producción agrícola	Lógica difusa	Signomial creciente	0	0,55
		Distancia Usos del suelo agropecuarios	Lógica difusa	Signomial decreciente	0	500
	Incendios	Frecuencia de incendios	Lógica difusa	Signomial creciente	0	4
Resiliencia	Zonas de protección	Zonas de protección	Asignación de valores	-	-	-
	Índice de recuperación	Índice de recuperación	Lógica difusa	Signomial creciente	0	1
	Conectividad	Conectividad	Lógica difusa	Signomial creciente	0	1

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3 Integración de variables y factores mediante AHP y cálculo del índice de vulnerabilidad.

Para integrar los factores de la vulnerabilidad, se propuso el uso de un modelo multicriterio de jerarquía Analítica (AHP), cuya estructura jerárquica y matriz de análisis se establecieron mediante la revisión de literatura buscando una articulación entre los factores planteados y los criterios seleccionados, entendiendo como criterios los parámetros para evaluar cada factor y variable entre sí, identificando su nivel de incidencia dentro de la vulnerabilidad (Pei et al. 2015). Se establecieron tres niveles de jerarquía. El primero corresponde a los componentes de la vulnerabilidad (sensibilidad, exposición y resiliencia), el segundo nivel a los factores, y el último a las variables.

Una vez establecida la jerarquía y orden de evaluación, se planteó el análisis de *Pairwise comparison*, realizando las comparaciones entre las variables para cinco factores (estado de la vegetación, estructura del paisaje, condiciones abióticas, infraestructuras y actividades agropecuarias); para los restantes cuatro factores (población, minería, zonas de protección regional y zonas de protección nacional) no se realizó matriz debido a que tenían menos de tres variables, por lo cual la comparación por pares se hace directamente según lo establecido por Saaty (1997). Adicionalmente, se plantearon tres matrices comparando los factores entre sí para cada componente (sensibilidad, exposición y resiliencia).

Específicamente para el complejo de páramos de Pisba, se usó criterios de 7 expertos en diferentes temáticas asociadas a los ecosistemas de páramo. Cada experto asignó un índice de importancia para comparación de acuerdo a una escala de valoración establecida por Saaty (1997) e implementadas en el software TerrSet. A continuación, se presenta el modelo de matriz de comparación establecida en los análisis de multicriterio (Tabla 4-6).

**Tabla 4-6: Matriz y escala de comparación del análisis multicriterio.**

Factor o variable	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	1	-	-	-	-
A <sub>2</sub>	5	1	-	-	-
A <sub>3</sub>	1/7	1/3	1	-	-
A <sub>4</sub>	1/5	3	5	1	-
A <sub>5</sub>	3	1/5	7	5	1

*Elaboración propia con base en Saaty (1997). 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 siguientes índices establecidos por Saaty (1997):

**Índice de inconsistencia (IC):** se usa para determinar el grado de consistencia de los juicios empleados en las matrices; es la relación del valor lambda que es el máximo autovalor de la matriz y el número de valores en la matriz n (Adriano Coronel 2012):

$$Ci = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

**Índice aleatorio de consistencia (IA):** Es el valor medio del índice de consistencia, cuyos valores ya están establecidos dependiendo del tamaño de la matriz (n) (Adriano Coronel 2012). Para el presente estudio se usó 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, según lo establecido por Saaty (1997).

**Índice aleatorio de consistencia (II):** es la relación que existe entre el índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio de consistencia (IA) los valores aceptados para este índice tienen que estar por debajo de 0.10.

$$II = IC/IA$$

Finalmente, para la generación del índice de la vulnerabilidad se propone utilizar la ecuación de (Turner et al. 2003), donde los valores más bajos son zonas con menor vulnerabilidad y los valores más altos zonas que presentan mayor vulnerabilidad.

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

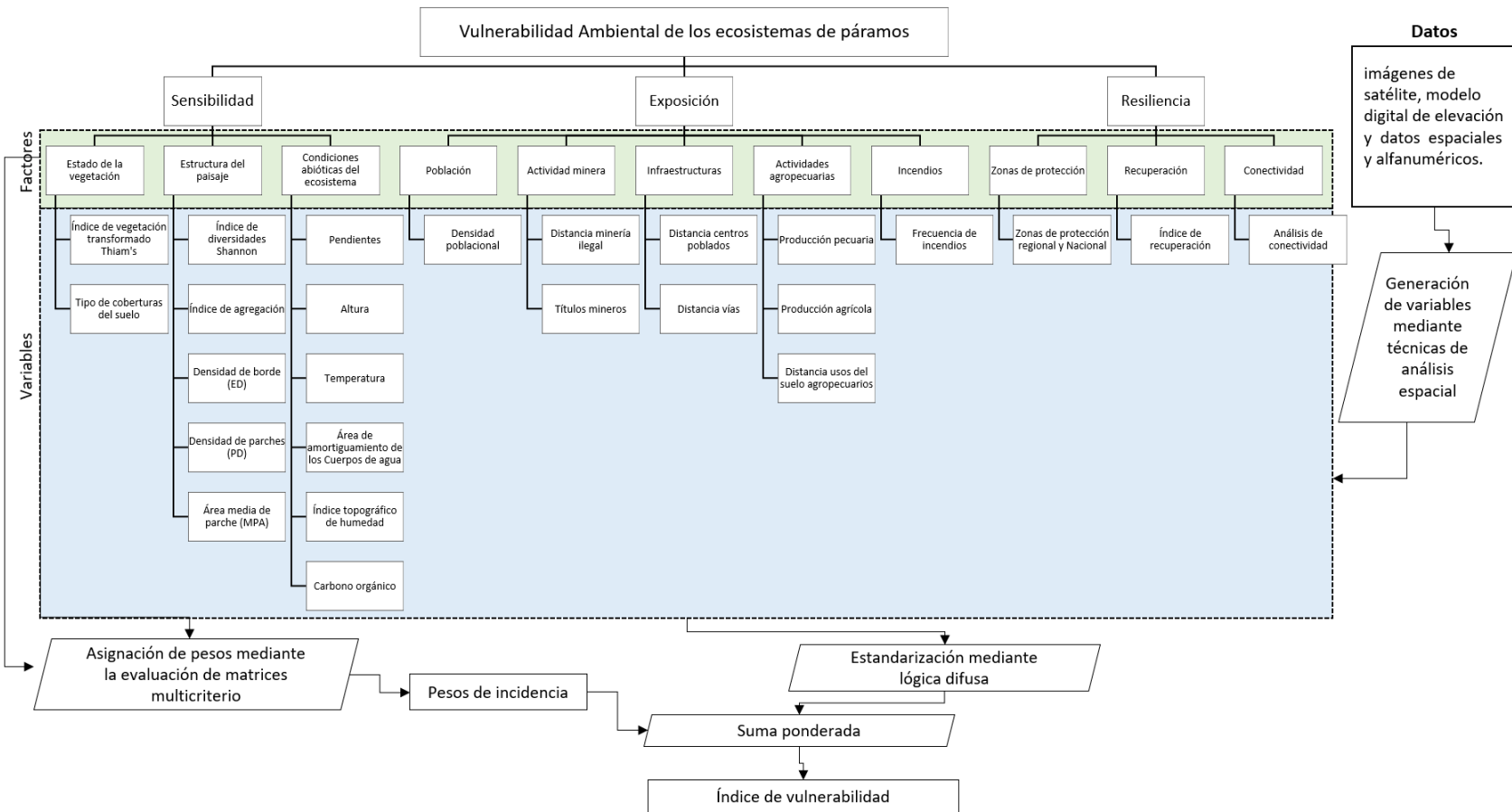
El esquema de la metodología propuesta se encuentra resumido en la Figura 4-2

## **4.2 Evaluación la metodología propuesta mediante su aplicación en el complejo de páramos de Pisba (Boyacá, Colombia).**

Para el año 2020, como resultado del algoritmo Random Forest, se obtuvo una exactitud de 0.875 calculada mediante el índice Kappa. En términos generales, el área de estudio posee 71,7% de coberturas asociadas a vegetación de paramo, 11,34% a bosques andinos, 0,12% cuerpos de agua, 15,87% pastos y cultivos, 0,63 plantaciones forestales y 0,3% suelo desnudo (Figura 4-3). Las zonas asociadas con actividades agropecuarias se localizan sobre el borde occidental del páramo y corresponden a los Municipios de Jericó, Socha, Tasco, Gámeza y Socotá. También se desatacan los el municipio de Socotá y Chita que poseen la mayor área con ecosistemas naturales.

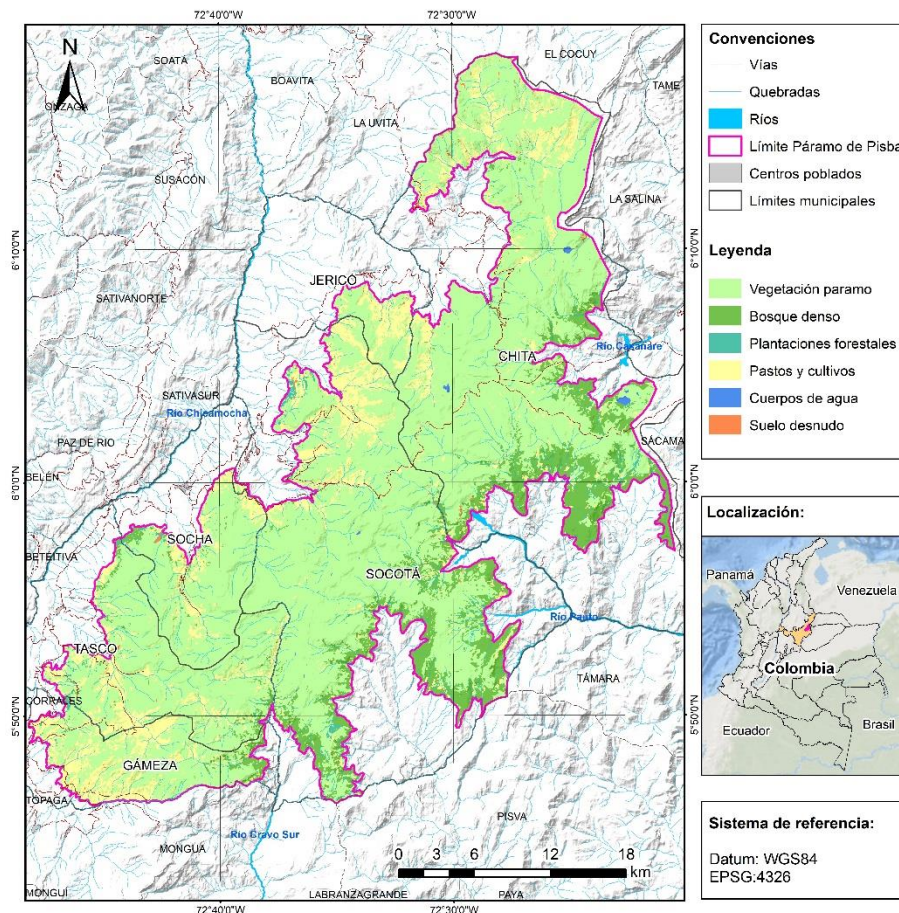


Figura 4-2: Esquema metodológico propuesto para la evaluación de la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-3:** Coberturas del suelo para el Complejo de Páramo de Pisba para el año 2020



Fuente: Elaboración propia. Basado en imágenes Lantsat 8 2020 y uso de Random forest.

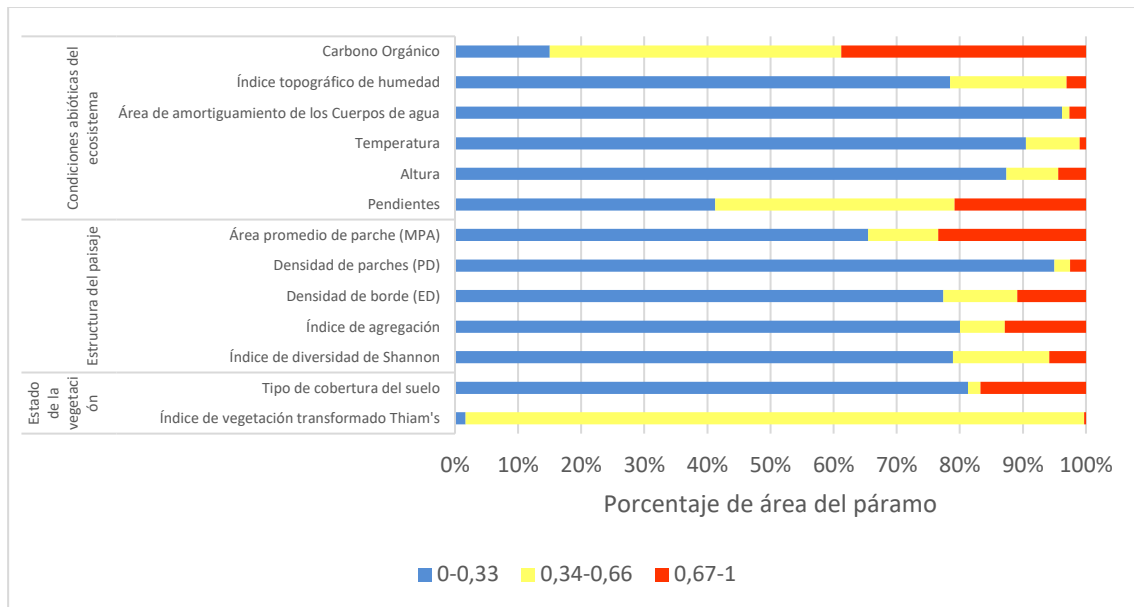
### 4.2.1 Espacialización de variables por cada factor asociado a la vulnerabilidad ambiental.

#### Sensibilidad

Respecto al análisis de áreas, el 68,34% de la zona de estudio presenta valores de sensibilidad dentro de un rango bajo (0-33%), y sólo 11,01% valores altos (> 0,67). Los valores medios de las variables analizadas en el componente, oscilaron entre 0,58 y 0,04, donde los valores más altos indican mayor sensibilidad y posible vulnerabilidad ambiental. Las variables de carbono orgánico (60-84,4 ton/ha), área promedio de parche (0-133m<sup>2</sup>), pendientes (0-15°) y tipo de coberturas (pastos, cultivos y suelo desnudo) presentaron en

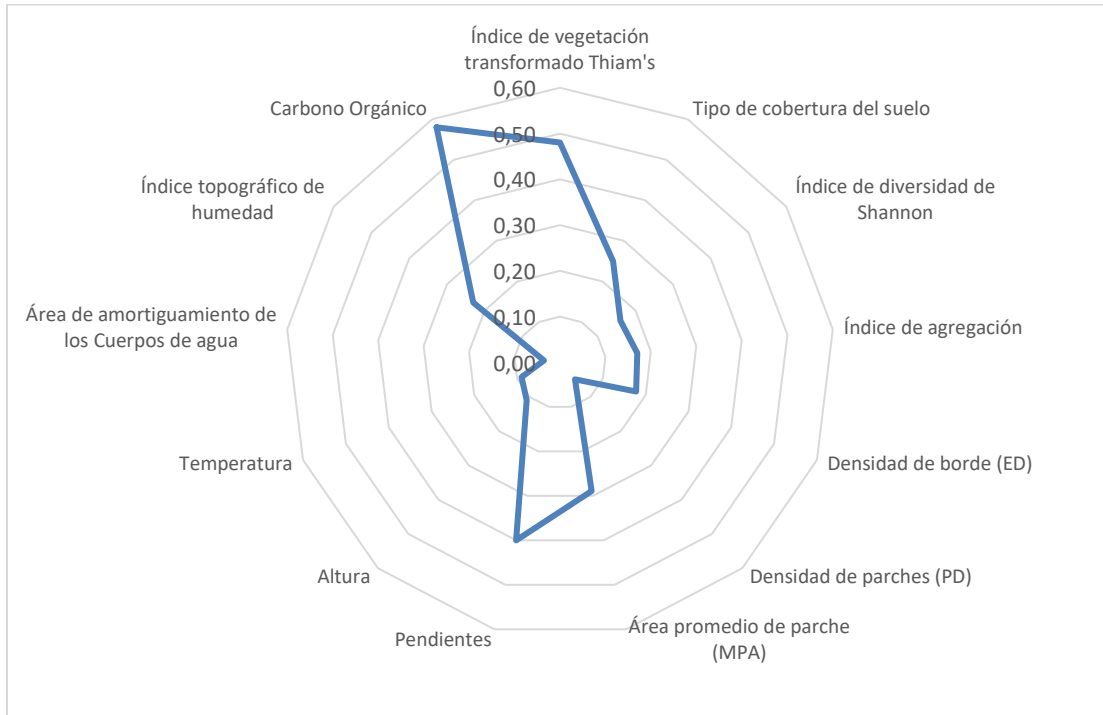
términos de área ocupada, los valores más altos, mientras que las variables áreas de amortiguamiento a los cuerpos de agua (distancias mayores a 30 m), temperaturas ( $<9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y altura ( $>3100\text{ msnm}$ ), presentan mayor área con valores bajos (Figura 4-4), es decir menos vulnerables ambientalmente. Se destaca el índice de vegetación transformado, cuyos valores a la sensibilidad son intermedios (0,34-0,66), ocupando cerca del 90% del área de estudio. Respecto a los valores medios para cada variable (Figura 4-5), el carbono orgánico tuvo una media de 0,58 (95,5 ton/ha), seguido por las pendientes con 0,4 ( $25^{\circ}$ ) y el área promedio de parche con 0,29 (4100m<sup>2</sup>). La variable con menor media correspondió a las áreas de amortiguamiento, con solo 0,04 (364m de distancia promedio a los cuerpos de agua).

**Figura 4-4:** Distribución de los valores de cada variable en términos de porcentajes totales de área para la sensibilidad



*Fuente: Elaboración propia, el color azul indica valores bajos, color amarillo valores medios y color rojo valores altos en cada variable, siendo los valores más altos indicadores de mayor sensibilidad.*

**Figura 4-5: Comparación de valores medios para cada variable de sensibilidad.**

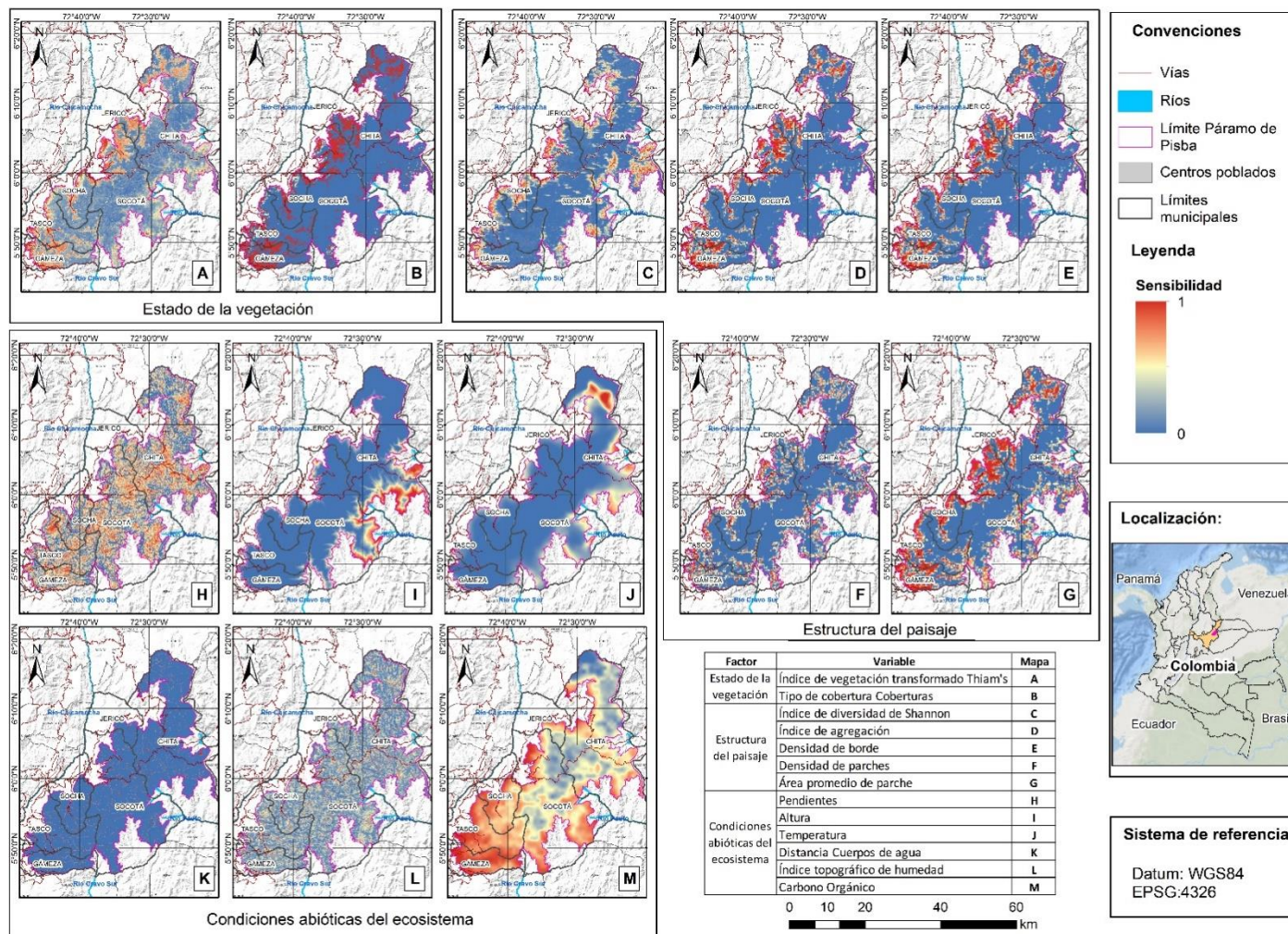


*Fuente: Elaboración propia, la media de los datos se encuentra en torno al número de pixel del área de estudio.*

La distribución espacial de la sensibilidad se presenta en la Figura 4-6. Las coberturas muestran una mayor sensibilidad sobre la región occidental sobre los municipios de Gámeza, Tasco, Socha y Jericó. Las variables del factor estructura del paisaje muestran una mayor sensibilidad sobre los bordes del páramo, asociada al índice de agregación (0-0,33) y el índice de diversidad (4-5). Las variables del estado del ecosistema muestran diferentes patrones, mientras que las pendientes, distancia cuerpos de agua y el índice topográfico de humedad muestran una distribución homogénea: alturas (<2800 msnm) y temperatura (>12,5 ° C) muestran mayor sensibilidad sobre la zona norte y zona oriente del complejo de paramos y finalmente el factor de carbono orgánico muestra mayor sensibilidad sobre la zona centro sur de los municipios de Socha, Tasco y Gámeza.



Figura 4-6: mapas variables de sensibilidad del Complejo de Páramos de Pisba (Boyacá)



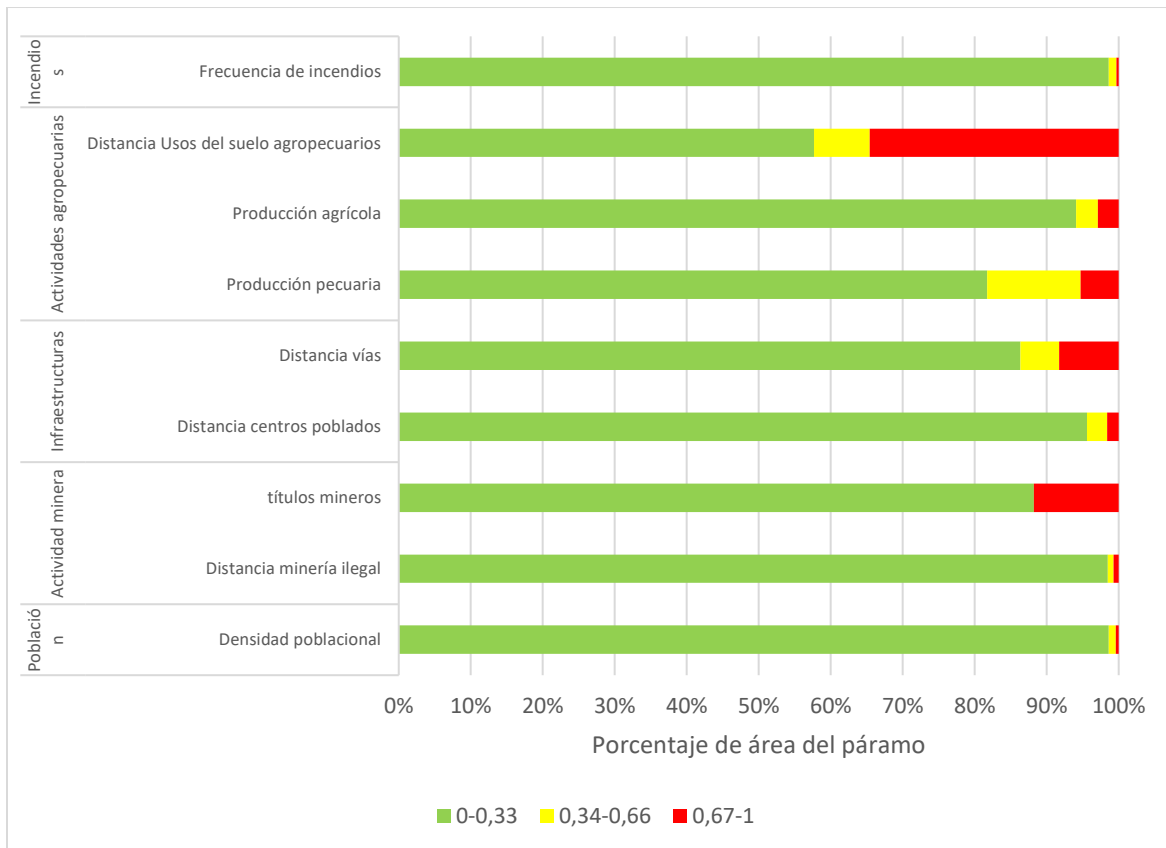
Fuente: Elaboración propia.

### Exposición

Los análisis espaciales utilizados para calcular las variables de exposición se componen en su mayoría por distancias euclidianas, arrojando una distribución espacial centrada en su mayoría sobre el borde occidental del páramo, por su parte el cálculo del diferencial de NBR para determinar los incendios mostró muchos valores residuales correspondientes a zonas de cambios de uso del suelo y no a incendios de la cobertura, por lo cual se debió realizar una depuración mediante la visualización de imágenes satelitales.

Respecto a las áreas, cerca del 89% del área tiene valores en un bajo rango (0-33%) y 7,31 en rango alto (> 0,67%). Las variables de exposición con mayor área en valores altos corresponden a la distancia a los usos agropecuarios 34,6% (0-250 m), seguido por títulos mineros (11,8%). La variable con mayor área con valores bajos corresponde a densidad poblacional 98,6% (0,2 personas/ha) (ver Figura 4-7).

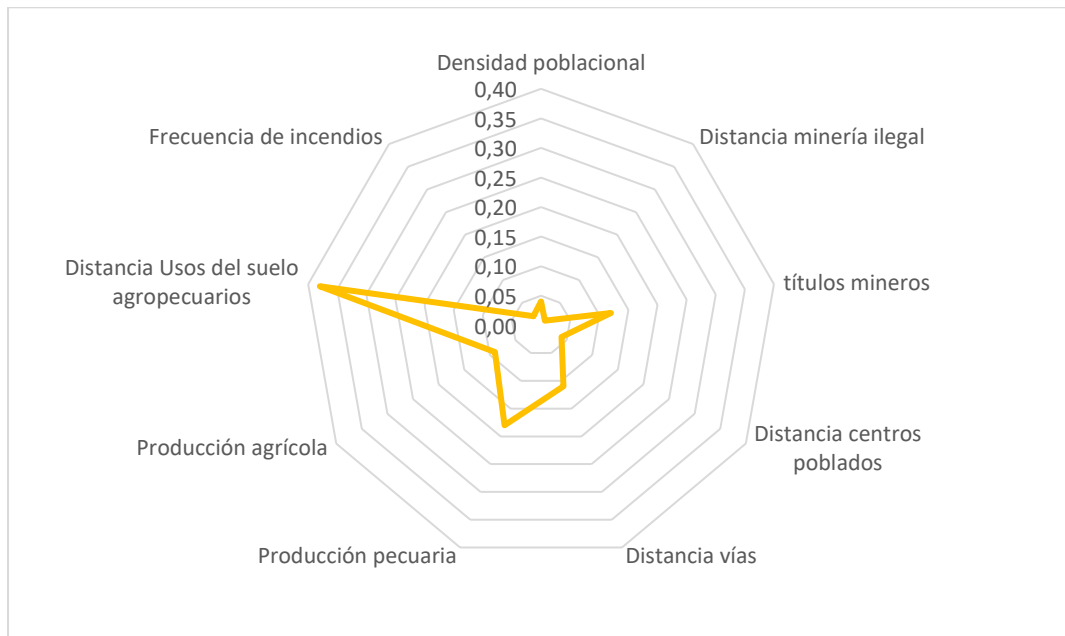
**Figura 4-7:** Distribución de los valores por cada variable en términos de porcentajes totales de área para la exposición.



*Fuente: Elaboración propia, el color verde indica valores bajos, color amarillo valores medios y color rojo valores altos en cada variable siendo los valores más altos indicadores de mayor exposición.*

La media de las variables de exposición oscilo entre 0,38 (780 m correspondiente a la distancia a los usos agropecuarios) y 0,01 (20 km correspondiente a la distancia a minería ilegal) (ver Figura 4-8). La Figura 4-9 muestra la distribución espacial de las variables que componen este factor. Se observa que las actividades agropecuarias (distancia a cultivos, producción agrícola y producción pecuaria) son las variables con mayor heterogeneidad espacial, presentando valores mayores sobre la región occidental del complejo de paramos. Finalmente, la distancia de vías presenta mayor densidad en la zona occidental, junto con los centros poblados asociados a los municipios de Municipios de Gámeza, Tasco, Socha y Jericó. La distribución espacial de las variables incendios mostró una homogeneidad con un rango bajo de exposición para toda el área de estudio.

**Figura 4-8:** Comparación de valores medios para cada variable de exposición.

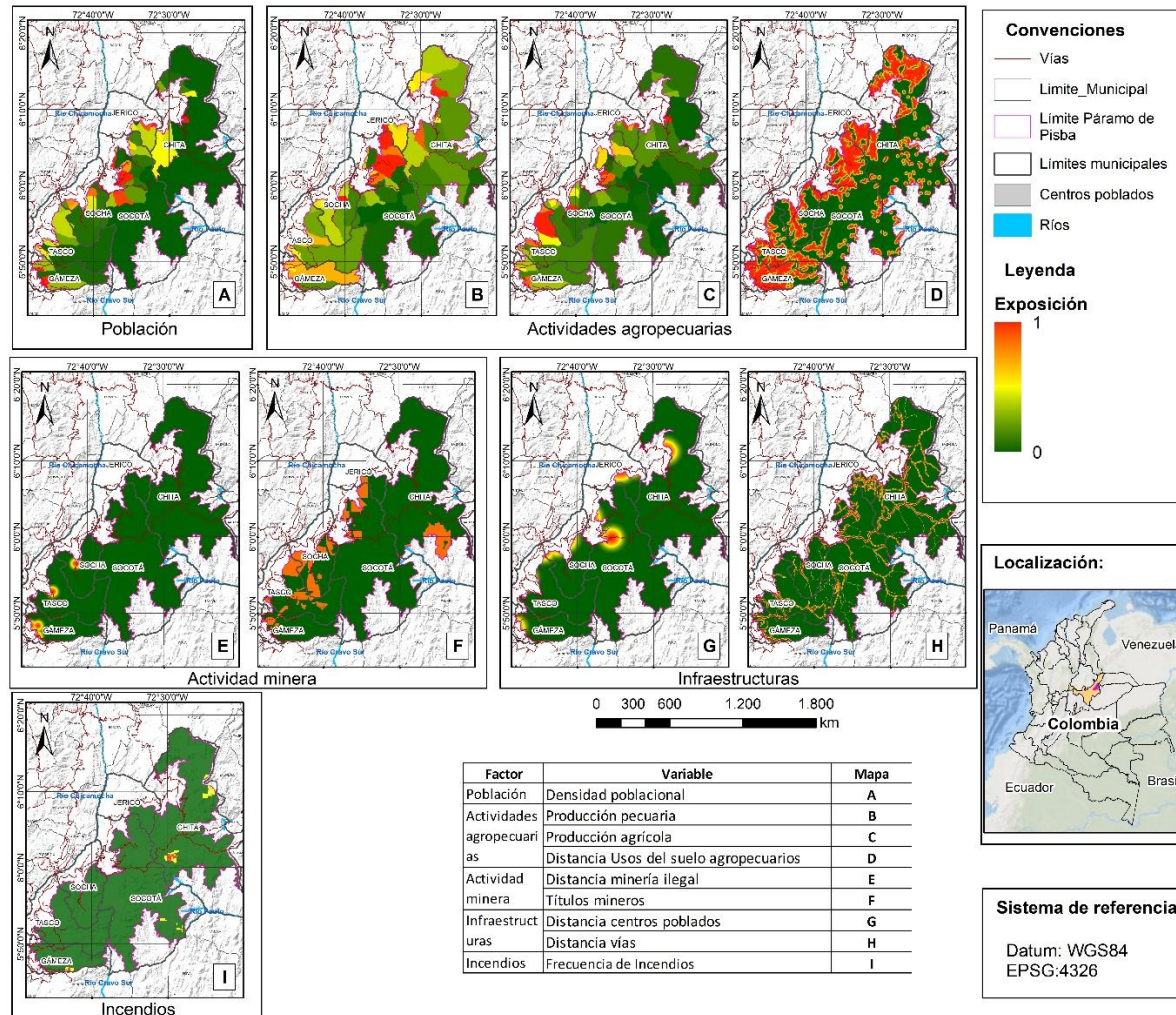


*Fuente: Elaboración propia, la media de los datos se encuentra en torno al número de pixel del área de estudio.*



72 Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

Figura 4-9: Mapas variables exposición del Complejo de Páramos de Pisba (Boyacá)



Fuente: Elaboración propia

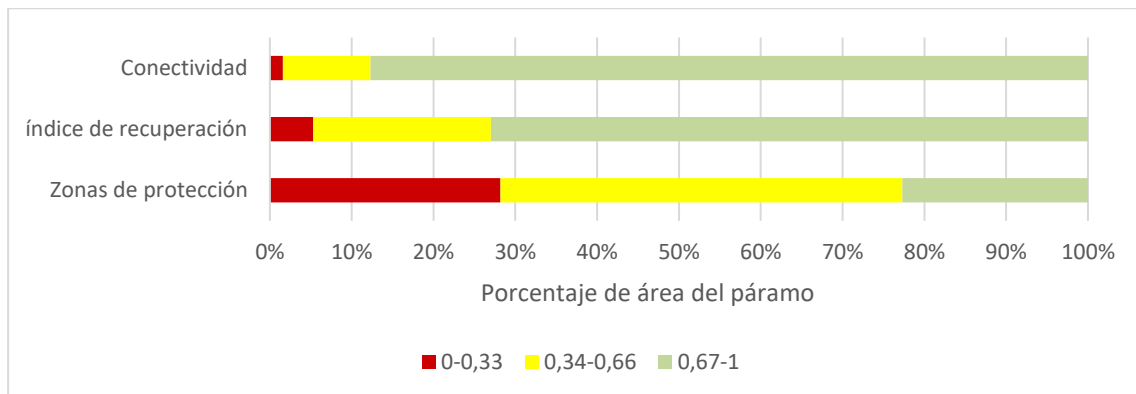


### Resiliencia:

El análisis de conectividad implementado mediante el algoritmo de vecindad identificó los pequeños cambios en cobertura natural y fragmentación de la misma. Por su parte el cálculo de la resiliencia mediante la comparación de NDVI obtuvo valores negativos en el 95,2% del área, es decir no se presentaron zonas significantes que sugirieran una recuperación de vegetación posteriormente a un cambio del uso.

El 11,69% del área presenta valores del índice de resiliencia dentro de un rango bajo (0-33%), 27,19% en rango medio (34-66%) y cerca del 61% tiene valores altos (> 0,67), donde los valores altos en el índice indican mayor resiliencia. La variable con mayor área en valores altas del índice corresponde a conectividad (87,7%), seguido por el índice de recuperación (73%). Las zonas de protección por su parte tienen mayor aporte en valores medios y bajos (zonas sin protección y zonas con protección regional) (Ver Figura 4-10).

**Figura 4-10:** Distribución de los valores por cada variable en términos de porcentajes totales de área para la resiliencia.



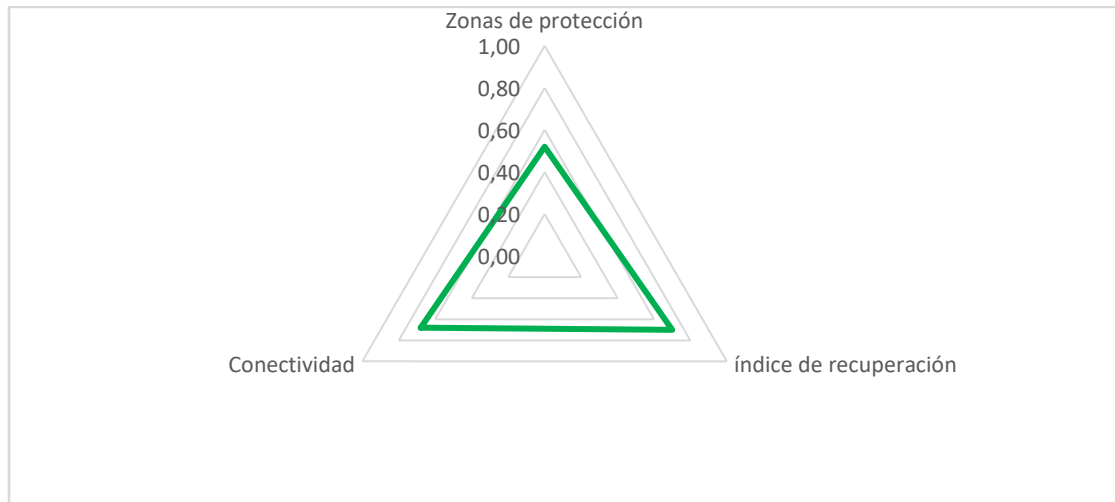
*Fuente: Elaboración propia, el color rojo indica valores bajos, color amarillo valores medios y color verde valores altos en cada variable, siendo los valores más altos indicadores de mayor resiliencia.*

La comparación entre las medias de las variables de resiliencia muestra que la variable con mayor media es el índice de recuperación con 0,7 seguido de la conectividad con 0,68, siendo la protección la variable con menor media con 0,52 (ver Figura 4-11).

Respecto a la distribución espacial de la resiliencia, se observan valores más bajos sobre la región sur, centro occidente y norte. Se destaca una pequeña zona ubicada en la región sur sobre los municipios de Tasco, Socha y Socotá, la cual corresponde al Parque Nacional Natural Pisba. En la zona central predominan los valores medios que se asocia a una protección por parte del POMCA de que Río Cravo Sur y finalmente las zonas en valores

bajos no tienen asociadas ninguna figura de protección. El factor de recuperación tuvo valores bajos en la zona occidental (ver Figura 4-12).

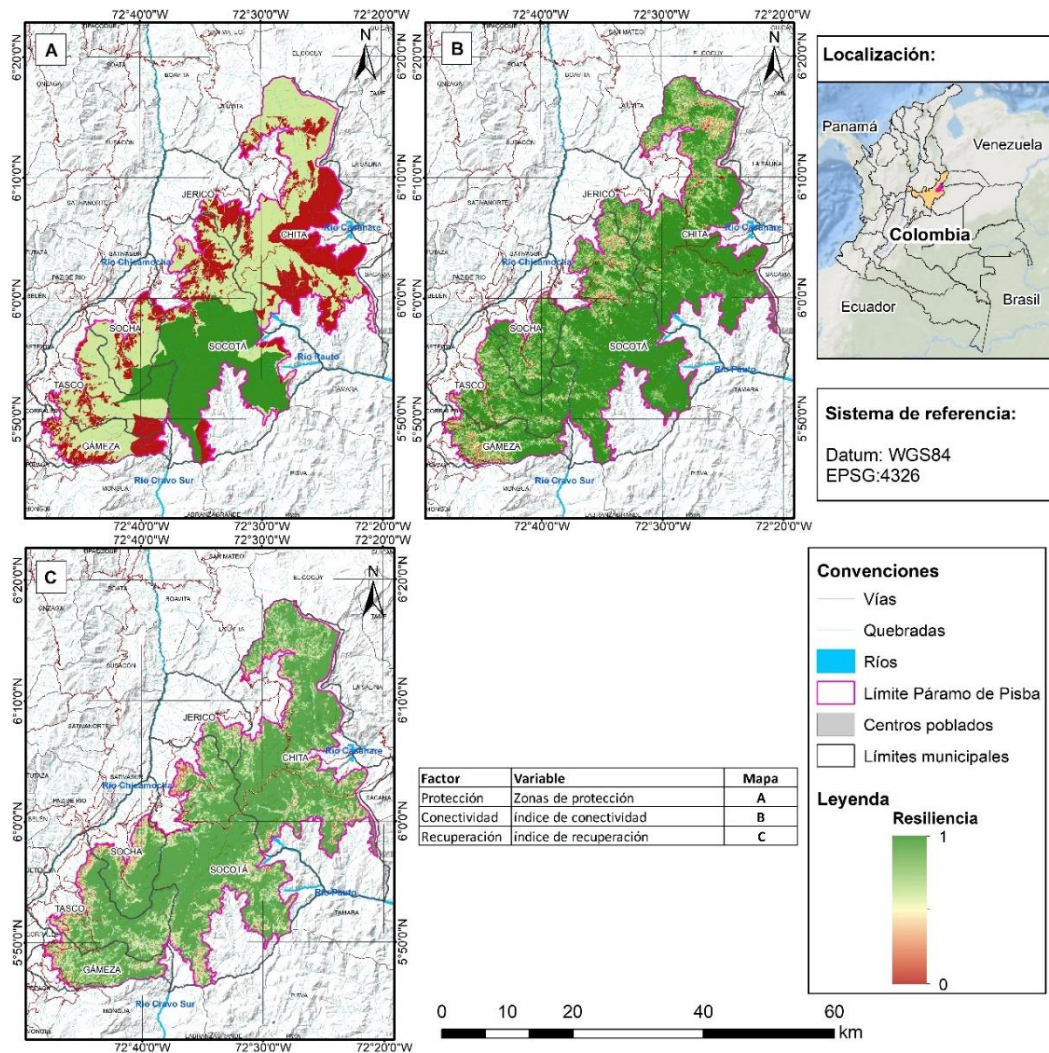
**Figura 4-11:** Comparación de valores medios para cada variable de resiliencia.



*Fuente: elaboración propia, la media de los datos se encuentra en torno al número de pixel del área de estudio.*

Respecto a la distribución espacial de la resiliencia, se observan valores más bajos sobre la región sur, centro occidente y norte. Se destaca una pequeña zona ubicada en la región sur sobre los municipios de Tasco, Socha y Socotá, la cual corresponde al Parque Nacional Natural Pisba. En la zona central predominan los valores medios que se asocia a una protección por parte del POMCA de que Río Cravo Sur y finalmente las zonas en valores bajos no tienen asociadas ninguna figura de protección. El factor de recuperación tuvo valores bajos en la zona occidental (ver Figura 4-12).

**Figura 4-12:** Mapas de variables de resiliencia del Complejo de Páramos de Pisba (Boyacá)



Fuente: Elaboración propia.

### Correlación de variables

Como resultado de la generación de las matrices de correlación entre variables, se destaca el índice de agregación, el cual presenta valores por encima de los 0,8 con variables como distancia minería ilegal, distancia centros poblados, distancia vías y distancia usos agropecuarios; adicionalmente esta variable muestra correlaciones positivas de 0,86 y 0,76 con las variables de pendientes y alturas, indicando que los ecosistemas de paramo tienen mayor sensibilidad en zonas con menor altura y menores pendientes, lo cual facilitaría la expansión de la frontera agrícola, y una correlación negativa con la capacidad de recuperación con un valor de 0,72. Por su parte la minería ilegal mostró altos índices de

correlación con la distancia a los centros poblados (0,98) y vías (0,93) lo cual determina que las actividades mineras están estrechamente ligadas a la accesibilidad y cercanía a los centros poblados. Las pendientes y altura, obtuvieron índices de correlación por encima de 0,8 respecto a la distancia de vías e influencia de centros poblados, y correlaciones por encima de 0,7 respecto a las actividades agropecuarias, Se destacaron las variables asociadas a la estructura del paisaje las cuales presentan una correlación inversamente proporcional respecto a la conectividad. La matriz de correlaciones se encuentra en el Anexo A: Matriz de correlación de variables y los datos de las medias de cada variable se encuentran dentro del Anexo B: Distribución de áreas para los índices de las variables.

#### **4.2.2 Establecimiento de pesos de variables y factores la vulnerabilidad a partir del modelo multicriterio**

Como resultado de la evaluación de las 42 matrices multicriterio, se obtuvo un índice de inconsistencia menor al 0.1 en 30 y para 12 matrices el mayor índice tuvo un valor de 0.2. El componente de sensibilidad muestra un mayor peso, asociado al factor condiciones abióticas del ecosistema (38.1%), seguido de estado de la vegetación (35,4%). Se destaca las variables tipo de cobertura, área promedio del parche e índice topográfico de humedad como variables consideradas importantes. Para el componente de exposición el factor con mayor peso correspondió a incendios, seguido por actividades agropecuarias y el factor con menos peso fue la población, seguido por la minería ambos con menos del 10% cada uno, mientras que para el componente de resiliencia la conectividad fue considerada importante (47,2%) (ver Tabla 4-7).

La distribución espacial de los factores de sensibilidad mostró que el estado de la vegetación y la estructura del paisaje tuvieron una mayor concentración de valores altos al occidente del páramo, mientras que las condiciones abióticas sobre la zona occidente. En los tres factores evaluados, se observó una tendencia de mayor sensibilidad hacia los bordes de paramo, en los municipios de Gámeza, Tasco, Socha y Jericó donde predominan las coberturas de pastos y zonas con vegetación de páramo.

**Tabla 4-7:** Pesos de las variables y factores asociados a la vulnerabilidad ambiental del Complejo del Páramo de Pisba (Boyacá)

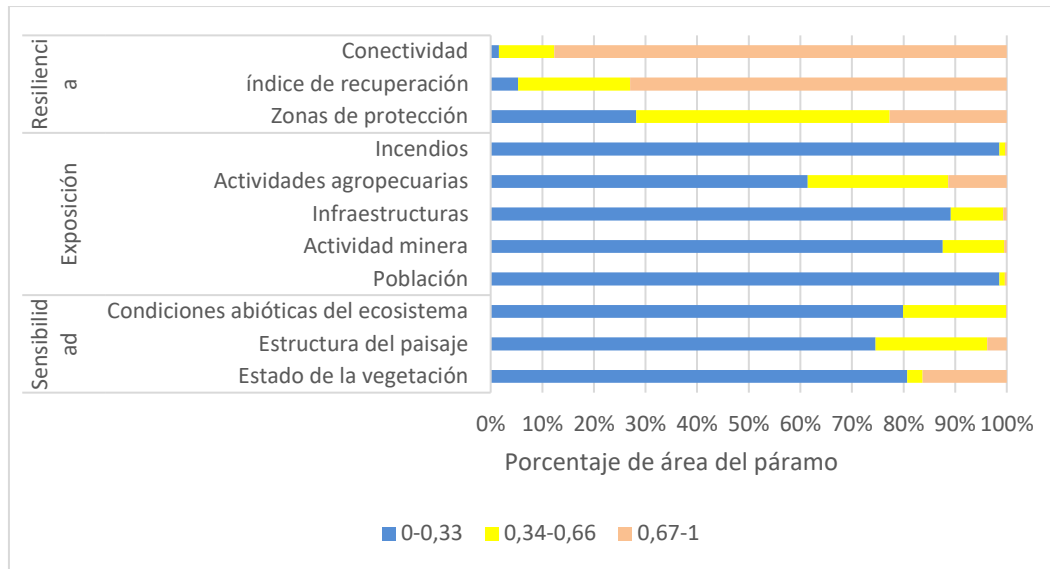
Componente	Factores	Peso	Variables	Peso
Sensibilidad	Estado de la vegetación	35,4%	Índice de vegetación transformado Thiam's	42,9%
			Tipo de cobertura Coberturas	57,1%
	Estructura del paisaje	26,5%	Índice de diversidad de Shannon	18,2%
			Índice de agregación	13,1%
			Densidad de borde (ED)	14,3%
			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%
Incendios	31,1%	Frecuencia de Incendios	100,0%	
Resiliencia	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%

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de actividades agropecuarias, infraestructura, minería y densidad poblacional presentaron valores altos sobre la zona occidente del complejo de páramo, siendo el factor de incendios el único que presentó un patrón diferente, identificándose zonas expuestas sobre parches pequeños en la zona sur oriente, sur occidente y región central. Los factores de resiliencia mostraron valores bajos sobre los bordes del área de estudio en los municipios de Gámeza, Socha y Chinita y la recuperación muestra menores valores sobre la región occidental (ver Figura 4-13).

Con respecto al aporte de áreas, la estructura del paisaje y condiciones abióticas (25% y 20% respectivamente) fueron los de más importantes para la sensibilidad, mientras que para exposición fue las actividades agropecuarias (38%), seguido por actividades mineras e infraestructuras respectivamente y el factor que menos aportó valores altos en términos de área correspondió a incendios (ver Figura 4-14).

**Figura 4-1:** Porcentaje de áreas totales por factores

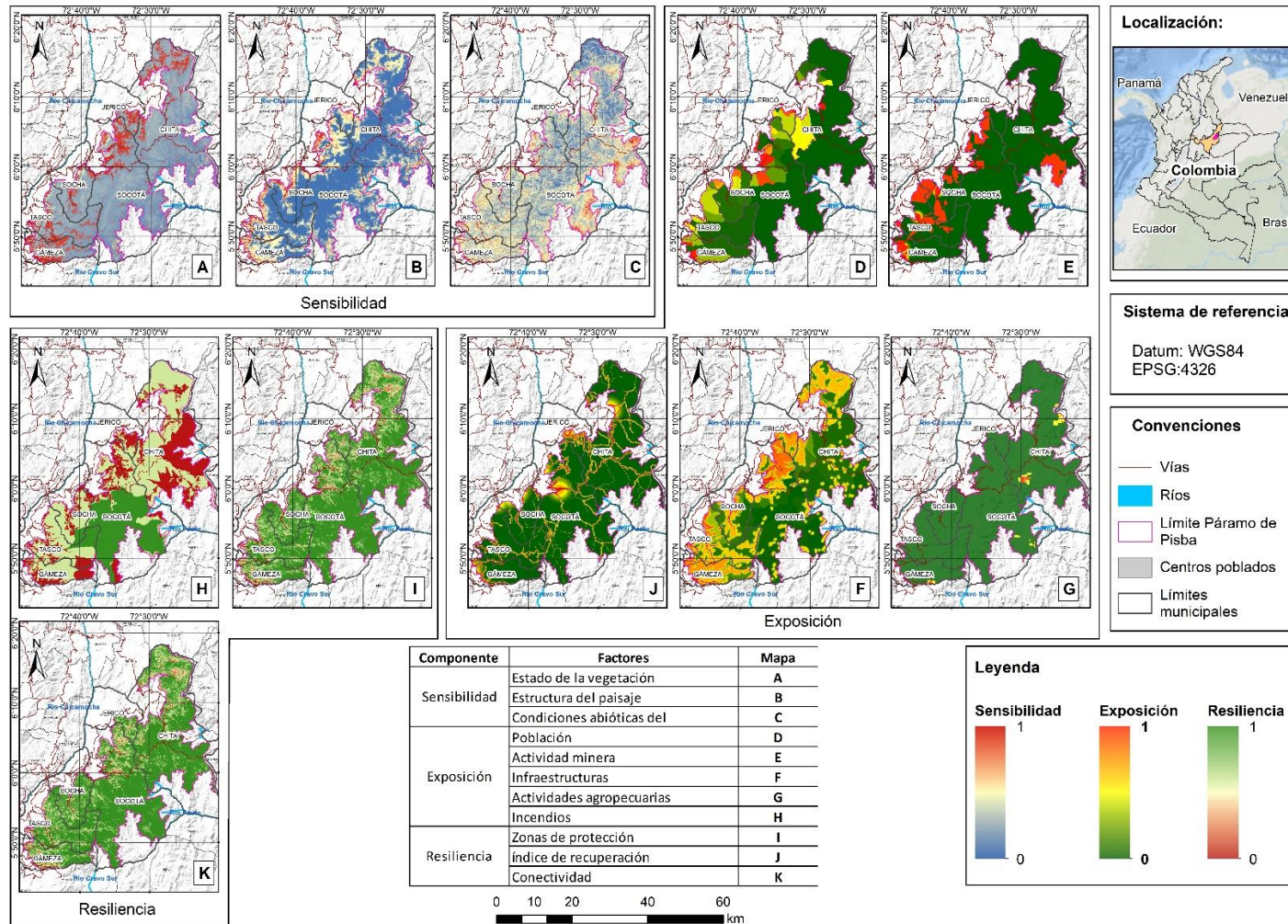


*Fuente: Elaboración propia, el color azul indica valores bajos, color amarillo valores medios y color naranja valores altos en cada factor, siendo los valores más altos indicadores de mayor resiliencia, mayor sensibilidad y mayor exposición.*

En la Figura 4-15, se muestran las medias por cada factor, observándose que los factores de resiliencia son los que presentaron un valor medio más alto, representado por el índice de recuperación con 0,7, seguido por la conectividad con 0,68 y zonas de protección con 0,52. El factor que más aportó a la sensibilidad correspondió a condiciones abióticas, y el factor en la exposición se asoció a actividades agropecuarias.

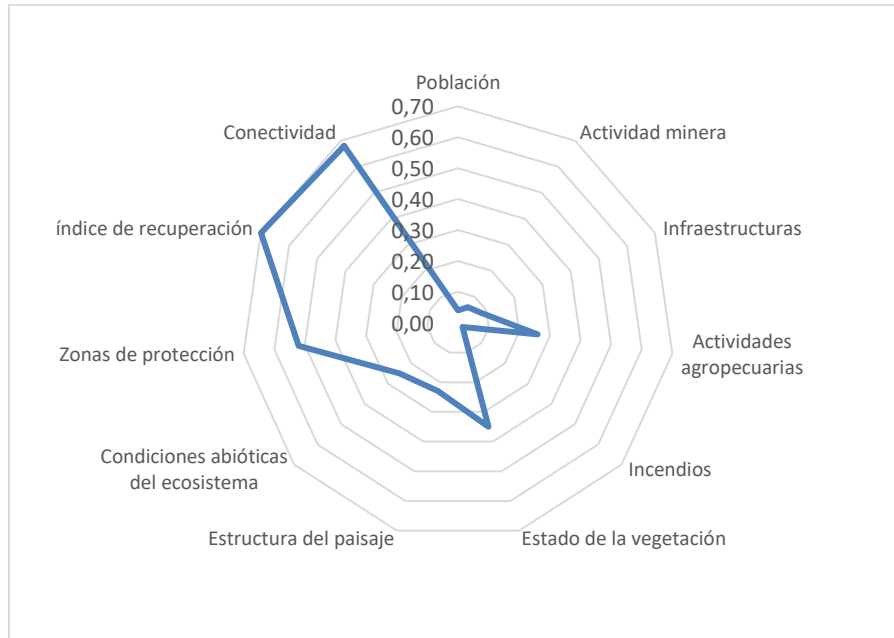


Figura 4-2: Mapas de factores de la vulnerabilidad ambiental Complejo de Páramos de Pisba (Boyacá)



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-3:** Comparación de valores medios para los factores considerados en la evaluación de la vulnerabilidad ambiental.

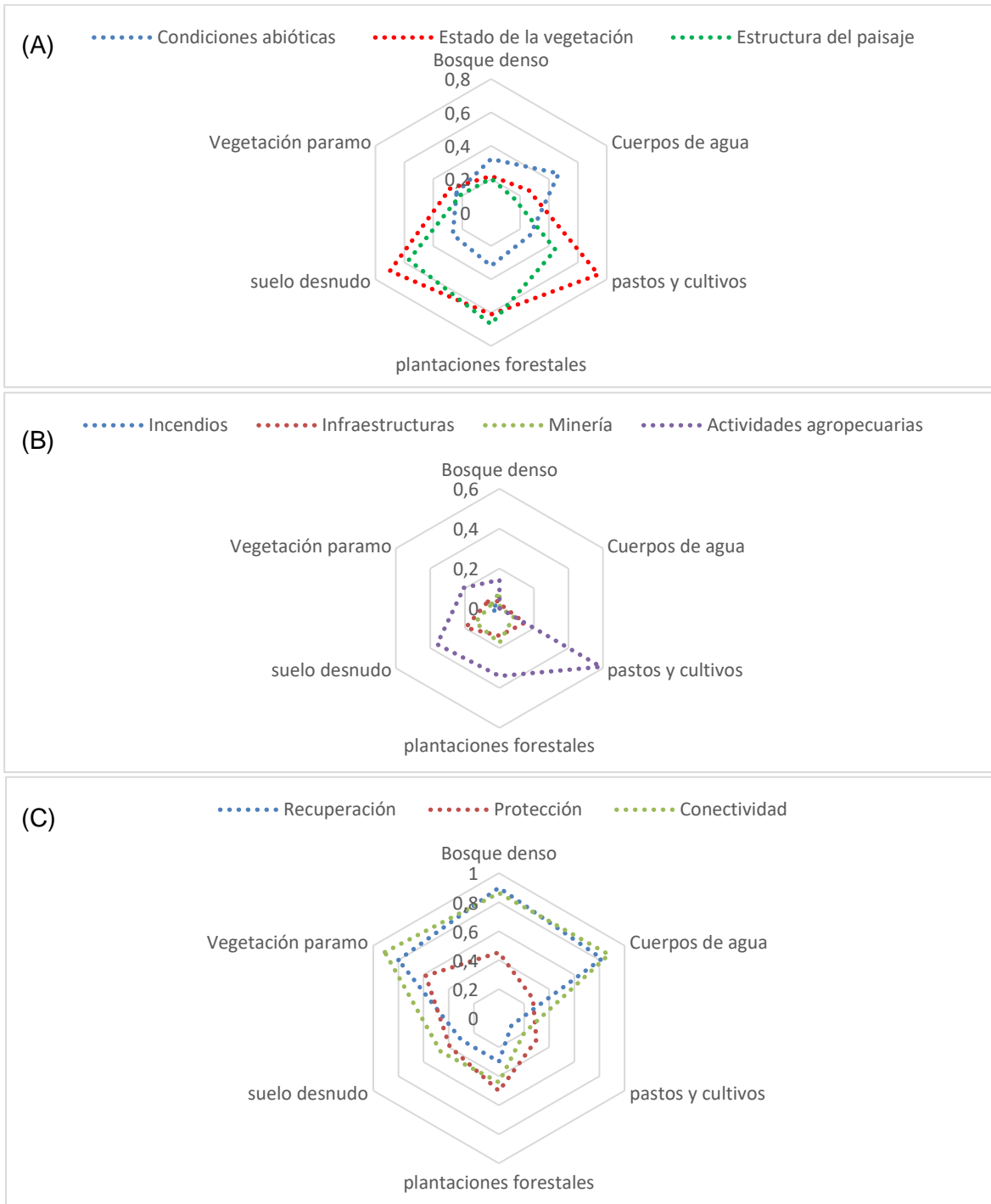


*Fuente: elaboración propia, la media de los datos se encuentra en torno al número de pixel del área de estudio.*

El análisis de los factores de la sensibilidad con respecto a cada cobertura del suelo, mostró que el estado de la vegetación y la estructura del paisaje poseen mayores valores medios en las coberturas de pastos y cultivos y suelos desnudos. Para las coberturas naturales en general los valores medios son inferiores a 0,3, sobre todo en la cobertura de bosques andinos ver Figura 4-16 (A). Los factores de exposición muestran mayor variabilidad en el factor actividades agropecuarias, sobre todo en las coberturas de pastos y cultivos con una media por encima de 0.5. Las coberturas naturales tienen valores medios inferiores a 0,2 indicado su baja exposición frente a son este factor ver Figura 4-16 (B). Finalmente, los factores de recuperación y protección muestran los mayores valores medios sobre las coberturas naturales (vegetación de páramo, bosque denso y cuerpos de agua) ver Figura 4-16 (C).



**Figura 4-4:** Valores medios de los factores de sensibilidad respecto cada tipo de cobertura del suelo



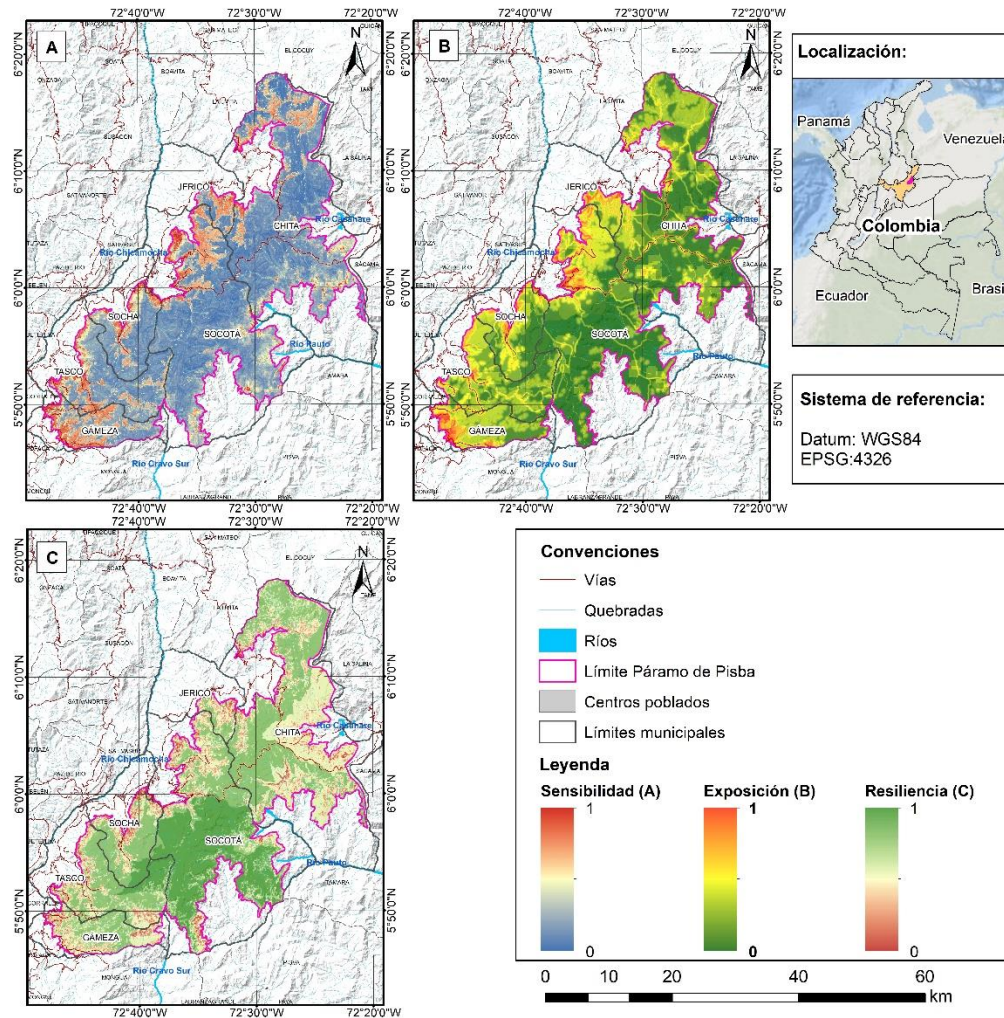
Fuente: elaboración propia, la media de los datos se encuentra en torno al número de pixel de cada cobertura.

### **4.2.3 Cálculo del índice de vulnerabilidad**

La distribución espacial el índice de sensibilidad, mostró valores altos (0,66-1) sobre la zona occidental del complejo de páramo destacando los municipios de Socotá, Tasco, Gámeza y Jericó, con aproximadamente 20% del área total; adicionalmente se observaron pequeños parches sobre el borde oriental en los municipios de Chita y Socotá (ver Figura 4-17 A). En el índice de exposición se observa una clara tendencia de los valores altos (0,66-1) sobre la región occidental con un aporte del 18% del área total, donde predominan coberturas antrópicas, asociadas a actividades agropecuarias y de minería, siendo los municipios más afectados Gámeza, Tasco, Socha y Jericó (Ver figura 4-17 B).

La resiliencia indicó que los bordes de paramo son las zonas donde se presenta menor resiliencia, asociada a cambios en las coberturas por usos del suelo, siendo las zonas más críticas las ubicadas sobre la región occidente del páramo con índices altos (0,66-1) y ocupando cerca del 26% del área de estudio, aumentando la vulnerabilidad. Se observan zonas de poca resiliencia sobre la región suroriente y nor-oriente (ver Figura 4-17 C).

**Figura 4-5:** Índice de sensibilidad, exposición y resiliencia del Complejo de Páramos Pisba (Boyacá)

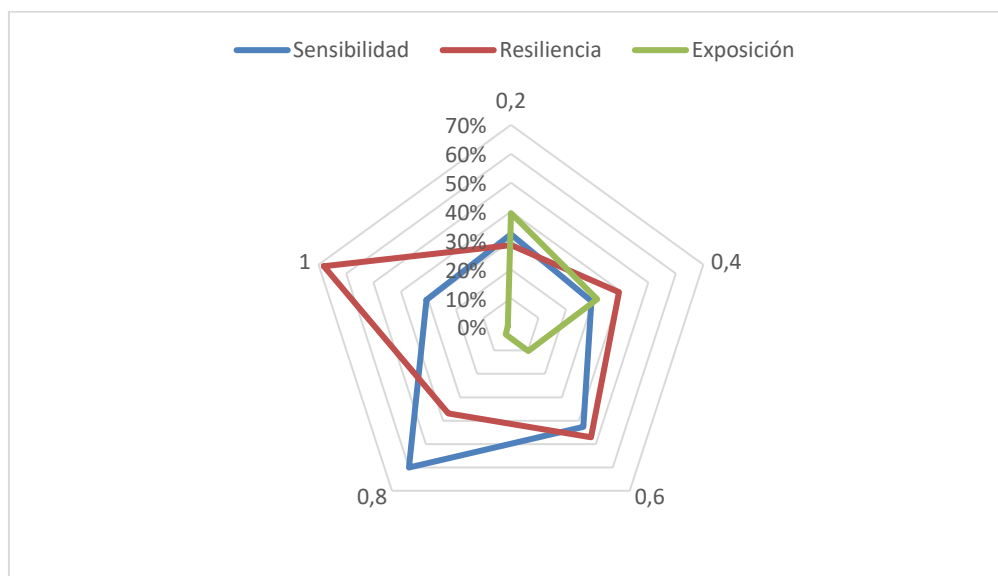


Fuente: Elaboración propia, para una mejor visualización se presentan los mapas en tamaño carta (Anexo D).

Respecto a las medias de los tres factores muestran que el factor de resiliencia aporta 68% del área para valores cercanos a 1, por otra parte, el factor de sensibilidad porta 60% del área para valores cercanos a 0,8, indicando que en términos de área os valores altos de resiliencia y sensibilidad prevalecen en el complejo (ver Figura 4-18).

Respecto a la correlación de los tres componentes, se observa que la exposición y sensibilidad poseen un valor de 0,57, lo cual indica una correlación directamente proporcional, por otro lado, la correlación de la resiliencia con la sensibilidad y la exposición muestran valores de -0,57 y -0,46 respectivamente, indicando una correlación inversamente proporcional (ver Tabla 4-8).

**Figura 4-6:** Comparación de valores medios para los componentes de la vulnerabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4-8:** Correlación espacial de componentes.

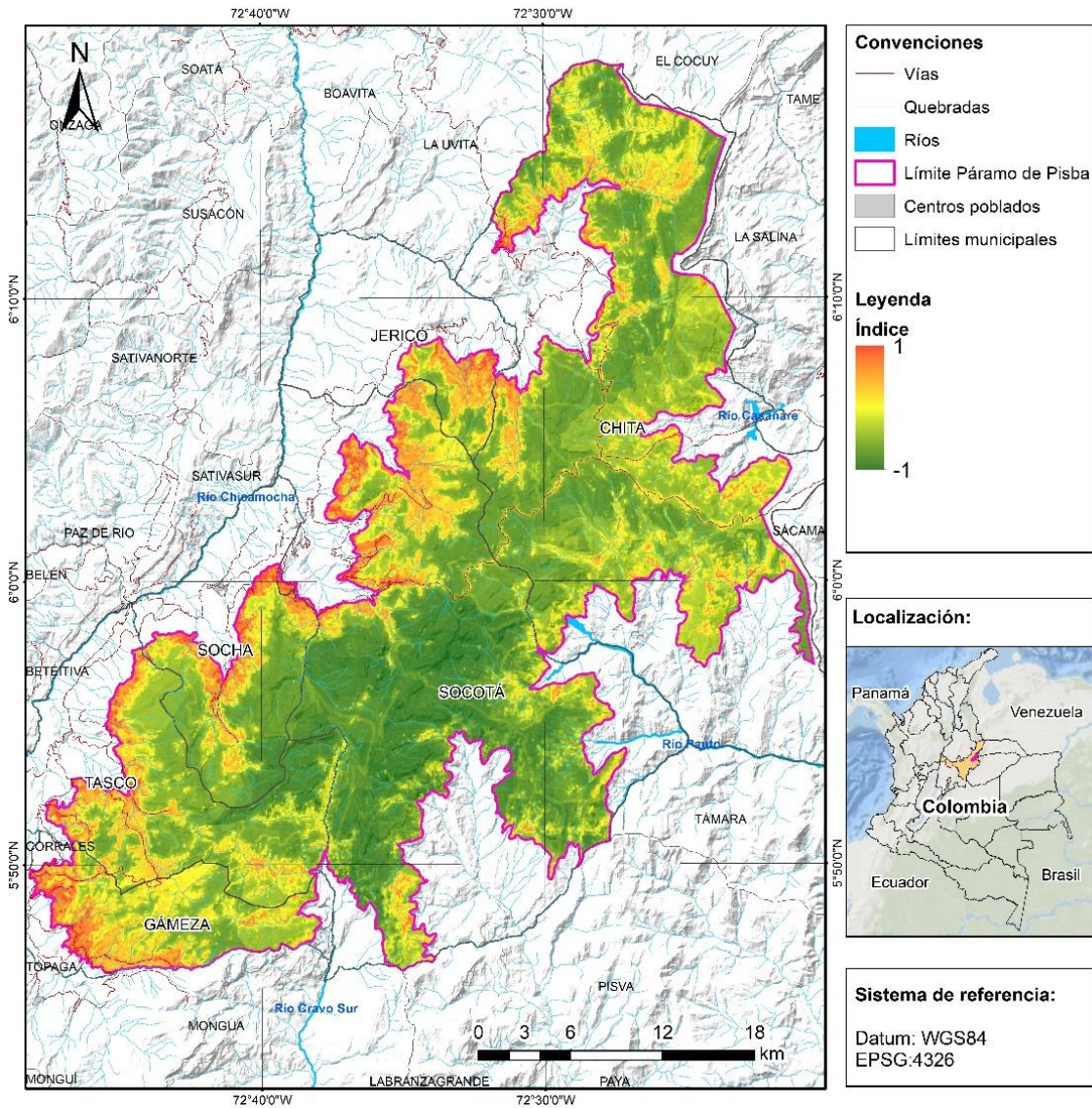
	Sensibilidad	Exposición	Resiliencia
Sensibilidad	1,00	0,57	-0,57
Exposición	0,57	1,00	-0,46
Resiliencia	-0,57	-0,46	1,00

Fuente: Elaboración propia.



En términos geográficos, el índice de vulnerabilidad presenta valores altos sobre la región occidental destacando los municipios de Gámeza, Tasco y Socha, con algunos parches sobre la región nor-oriental sobre el municipio de Gámeza y sobre chita sur-oriental. Los valores bajos se encuentran sobre región central del área de estudio, con una tendencia a la zona oriental, donde se ubica el PNN Pisba (Figura 4-19).

**Figura 4-7:** Índice de vulnerabilidad del Complejo de Páramos Pisba (Boyacá)

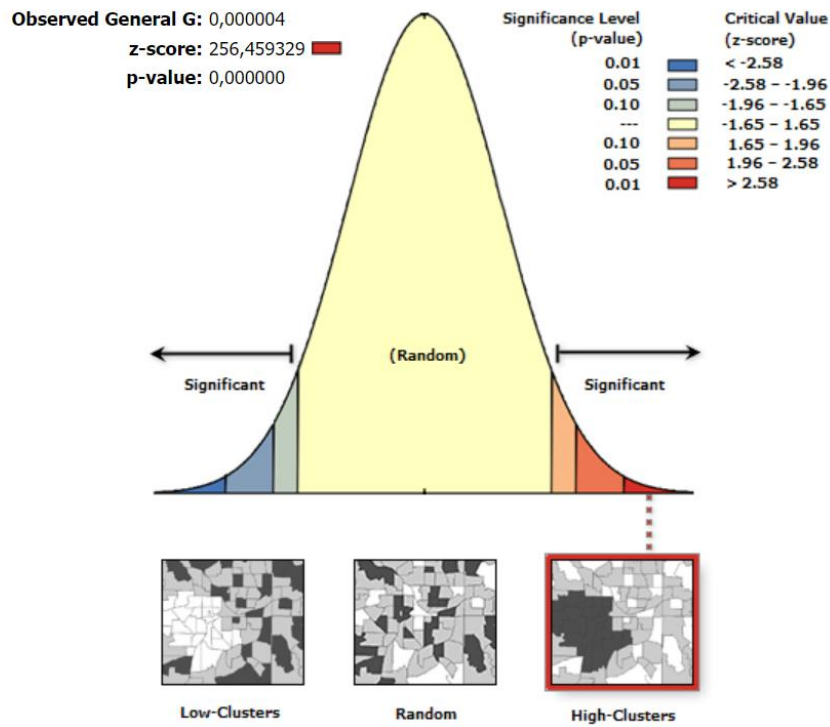


Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Identificación de patrones espaciales para la vulnerabilidad.

El análisis de patrones espaciales, encontró que el índice presenta una alta clusterización o agrupación, como muestra la Figura 4-20.

**Figura 4-8:**Distribución del análisis de clúster.



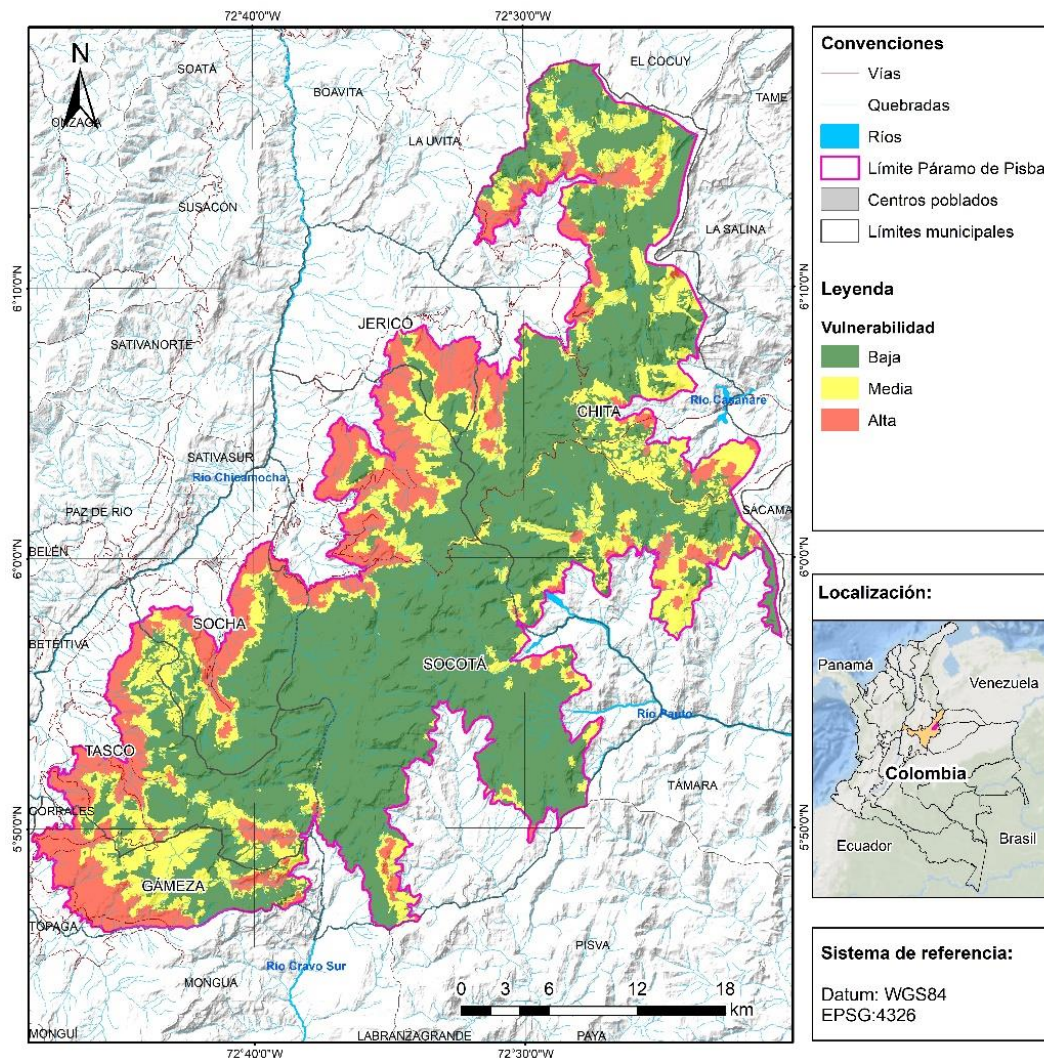
Fuente: Elaboración propia.

Los Hot Spot identificados como áreas con vulnerabilidad alta, ocuparon un área de 20970 ha equivalentes al 18,06% del área, y se encontraron principalmente sobre la región occidental de los municipios de Gámeza, Tasco, Socha, Socotá, Chita y Jericó, y sobre la región oriental del municipio de Chita, asociados a coberturas principalmente de pastos y cultivos y donde se destacan variables como la presencia de títulos mineros, densidad poblacional alta (0,8 - 1,2 per/ha), producción agrícola alta (36,7 - 55 % ha sembradas), actividad pecuaria alta (0,47-0,7 gan/ha), áreas medias de parche bajas (0-1330m<sup>2</sup>) y carbono orgánico bajo (60-84,4 ton/ha). Las zonas de no significancia categorizadas como vulnerabilidad media tienen un área de 25491 ha equivalentes a un 21.96% ubicadas



principalmente sobre la región sur-occidental sobre el municipio de Gámeza y la región nor-oriental en el municipio de Chita y asociadas a coberturas de bosques, pastos y cultivos, donde las variables más representativas hacen referencia a temperaturas medias altas ( $>12,5^{\circ}\text{C}$ ), alturas bajas ( $<2800$  msnm), carbono orgánico bajo (60-84,4 ton/ha), producción pecuaria media (0,23-0,47 gan/ha), presencia de incendios y falta de figuras de protección. Finalmente, los Cold Spot, categorizados como vulnerabilidad baja ocuparon un área de 69640 equivalente al 59.98%, distribuidos sobre las regiones centrales de los municipios, con excepción de la región oriental el municipio de Socotá, asociado a coberturas del páramo, destacando la presencia del PNN (ver Figura 4-21).

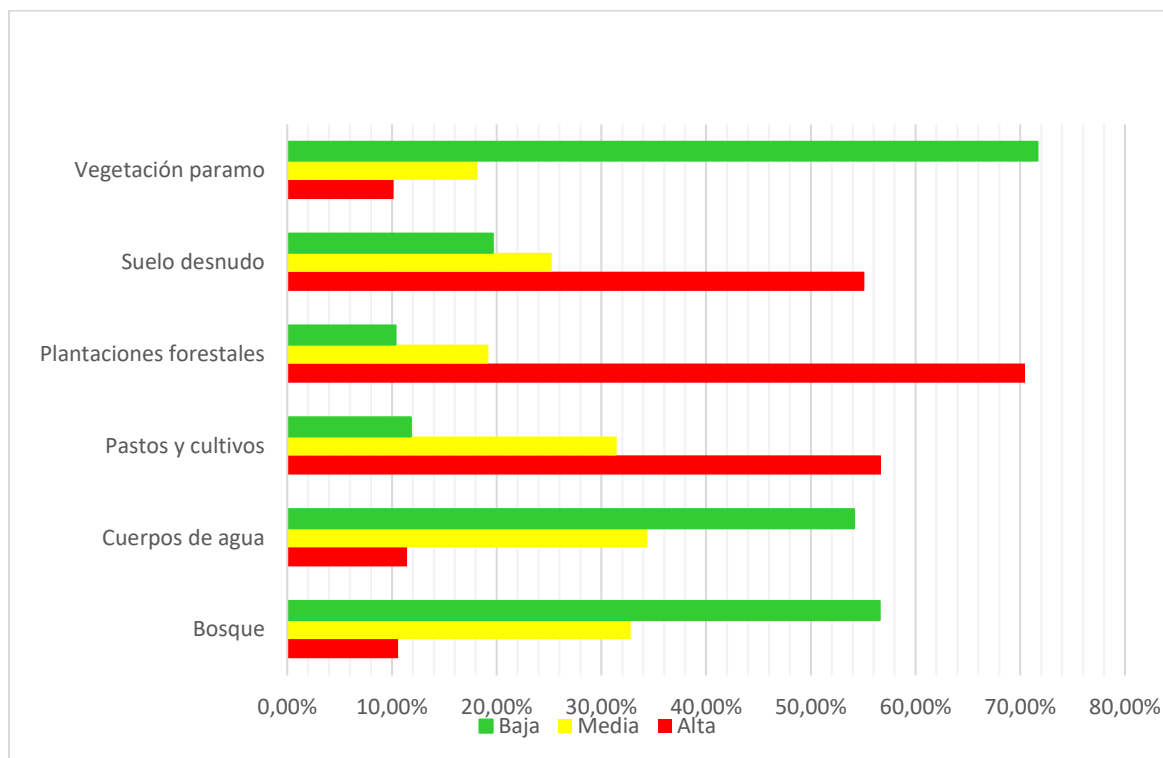
**Figura 4-9:** Zonificación de la vulnerabilidad del Complejo de Páramos Pisba (Boyacá)



*Elaboración propia*

En términos de porcentajes, las coberturas naturales más afectadas a nivel de vulnerabilidad ambiental, corresponden 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 paramo 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. (ver Figura 4-22).

**Figura 4-10:** Distribución de la vulnerabilidad respecto a las coberturas presentes en el Complejo de páramos de Pisba.



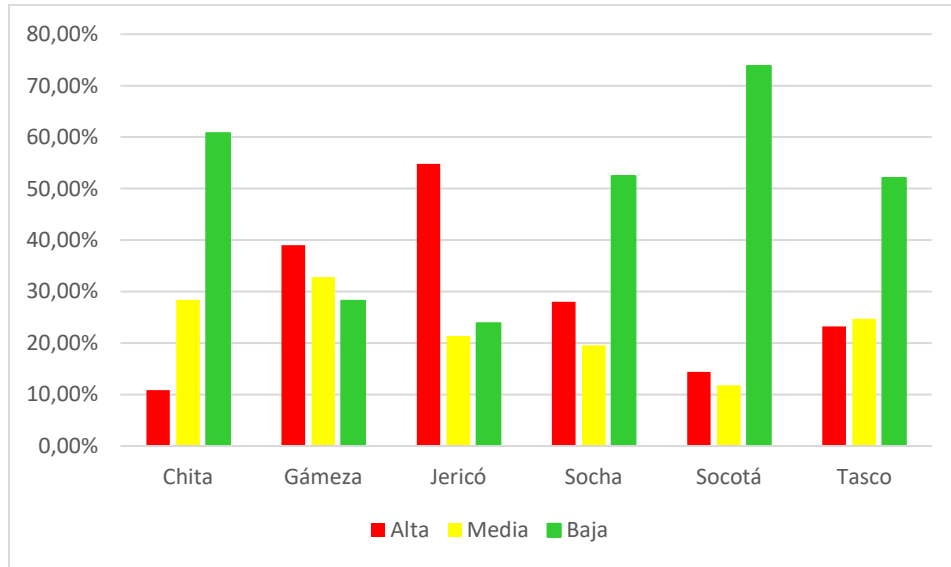
*Fuente: Elaboración propia.*

Respecto a la distribución en los municipios como se observa en el gráfico 4-21, el municipio de 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% (ver Figura 4-23). La vulnerabilidad de los municipios entorno a las coberturas naturales del suelo, se observa que el municipio de Jericó mostró un 80% y 34,57% de su cobertura de bosque y páramos respectivamente en vulnerabilidad



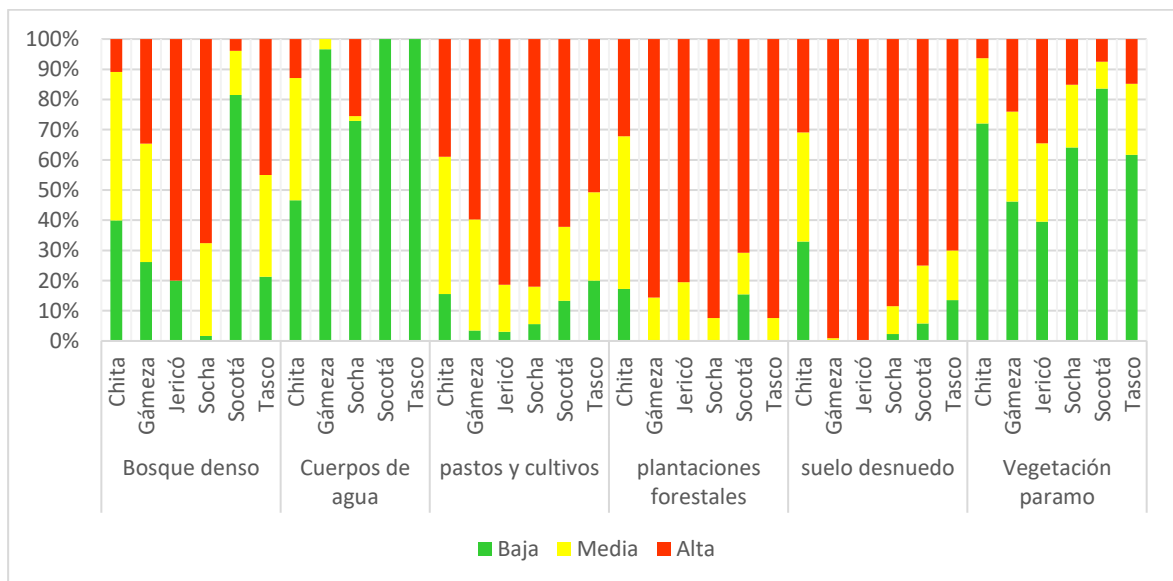
alta, y el municipio de Socha tuvo un 25,49% de sus cuerpos de agua en vulnerabilidad alta (ver Figura 4-24).

**Figura 4-11:** Categorías de la vulnerabilidad a nivel municipal dentro del Complejo de páramos de Pisba



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-12:** Porcentaje relativo de vulnerabilidad ambiental a nivel de coberturas del suelo



Fuente: Elaboración propia

En síntesis, gran parte del complejo de páramos de Pisba presenta una vulnerabilidad alta y media, con 46.000 hectáreas aproximadamente, lo cual es preocupante teniendo en cuenta la importancia ambiental y social que representa el ecosistema en la región. Como parte de los resultados, se propusieron algunas acciones de gestión generales (Tabla 4-9), para las diferentes zonas de vulnerabilidad identificadas en el ecosistema paramo de Pisba.

**Tabla 4-9:** Acciones de gestión sugeridas para las zonas de vulnerabilidad en el ecosistema

Coberturas/Vulnerabilidad	Baja	Media	Alta
Bosque denso	Conservación	Protección	Protección/Restauración
Cuerpos de agua	Conservación	Protección / Restauración	Establecimiento de zonas de amortiguación
Pastos y cultivos	Uso sostenible	Mitigación de impactos mediante agricultura sostenible y Prácticas agrícolas sostenibles y mosaicos de conservación	Mitigación de impactos mediante la mejora de técnicas de agricultura (labranza cero) y aplicación de agricultura sostenible y paisajes multifuncionales con énfasis en recuperar la funcionalidad del ecosistema
Plantaciones forestales	Aprovechamiento sostenible	Restauración con especies nativas	Restauración con especies nativas
Vegetación paramo	Conservación	Conservación y Restauración	Restauración

Fuente: elaboración propia

## 5. Discusión

La evaluación de la vulnerabilidad ambiental, se presenta como una alternativa en la identificación de impactos actuales y futuros de los ecosistema (De Lange et al. 2010), donde los componentes de exposición, sensibilidad y resiliencia y el análisis espacial y multicriterio que sustentaron la propuesta planteada en el presente estudio, representan las interacciones ente los sistemas humanos y ambientales, que pueden ser evaluados en diferentes escalas espaciales (Turner et al. 2003).

Nuestro estudio presentó una alternativa para la estimación de la vulnerabilidad que retoma conceptos y procedimientos efectuados por otros acercamientos como Evaluation Vulnerability Index (EVI) (Li et al. 2006), uso de indicadores Presión Estado Respuesta (PER) (Zhang et al. 2017), Componentes principales (PCA) (Liu et al. 2020) o estudio de la Estructura del paisaje (Bourgoin et al. 2020). Dentro de la metodología propuesta, se destaca el componente espacial como objetivo principal, donde al igual que en otros trabajos, se estructura y articulan los análisis de vulnerabilidad ambiental tal y como lo resalta (De Lange et al. 2010).

### **Técnicas de análisis espaciales**

El enfoque espacial que se le dio a la investigación a partir de la geomática, permitió de forma más sistemática la cuantificación y caracterización de la vulnerabilidad, coincidiendo con lo resaltado por (Ippolito et al. 2010) y (Bourgoin et al. 2020), donde el cálculo de variables que representan las condiciones y presiones principales de los páramos a partir de técnicas de análisis espacial puede facilitar su replicabilidad en otros complejos de paramos del país. Igualmente, la espacialización de variables tanto biofísicas como socio ambiental proveniente de diferentes fuentes de información y adaptadas a una escala de 1:25.000, fueron soportadas por diferentes técnicas de análisis espacial.

Respecto a las técnicas de análisis espacial utilizadas, las variables provenientes de imágenes satelitales, como el NDVI sigue siendo una herramienta importante en el diagnóstico del estado de la vegetación mediante la respuesta espectral de la misma (Duguy et al. 2012), y el cálculo de la frecuencia de incendios a partir del índice

Normalizado de Área Quemada (NBR), mostró buenos resultados basándose en la revisión de las imágenes satelitales, coincidiendo en lo encontrado por (Bar et al. 2020); sin embargo las limitantes de la disponibilidad y calidad de imágenes satelitales, pueden mejorarse utilizando imágenes satelitales con mejor resolución como Sentinel-2, las cuales han sido utilizadas por (Bourgoin et al. 2020) obteniendo buenos resultados en términos de resolución. La incorporación de variables asociadas a la estructura del paisaje basadas en algoritmos de vecindad, facilitaron la delimitación de bordes de paramo y zonas de mayor sensibilidad, retomando lo propuesto por (Bourgoin et al. 2020) en su estudio y son buenos indicadores de la vulnerabilidad.

El uso de Random Forest para delimitación de vegetación de páramos dio buenos resultados para nuestros objetivos, basándose en el índice kappa, tal como lo plantearon los estudios realizados por (Bourgoin et al. 2020), (Peyre et al. 2021) y (Yang et al. 2022), este algoritmo presenta ventajas debido a fácil parametrización, corto tiempo de cálculo y su baja sensibilidad en la selección de características lo cual disminuye el riesgo de *overfitting* o sobre estimación de valores atípicos de las muestras (Niu et al. 2021; Mercier et al. 2019) sin embargo se pueden a futuro plantear algoritmos alternativos como CAR o Machine Learning con el fin de obtener mejores índices Kappa.

Pese que la aplicación de co-kriging, tuvo buenos resultados en la generación de isotermas y alturas sobre el nivel del mar (error medio cuadrático de 0.97), se observó que el ajuste tiende a generalizar los pixeles, presentándose una superficie con pocos cambios a nivel de detalle, lo que puede incidir en la calidad de la información; esto se relaciona con la poca cantidad de datos presentes en el proceso geoestadístico (Getis 1995), y ratifica lo expresado por (Meneses Moreno et al. 2006; Ministerio Medio del Medio Ambiente 2002), quienes indican como limitante la disponibilidad de datos climáticos a nivel de ecosistemas de alta montaña.

El método signomial utilizado basándose en el comportamiento espacial se consideró que arrojó son resultados aceptables, al ser aplicado en un número considerable de variable continuas, suavizando los limites sobre los cortes de la función y estableciendo capas continuas sin cortes o cambios abruptos, facilitando los procesamientos matemáticos entre variables (Aryafar et al. 2013). Este método sirve como alternativa a procesos como análisis de componentes principales utilizados para establecer zonas homogéneas a partir de pocos factores involucrados en estudios de vulnerabilidad ambiental los trabajos de (Li

et al. 2006), (Choudhary et al. 2018) y (Nandy et al. 2015) o la categorización de variables para la asignación de pesos como la implementada por (Choudhary et al. 2018).

Respecto a la implementación de los Hots Spot y Cold Spot el método Getis-Ord General G para la distribución de la vulnerabilidad coincide con las zonas de mayor intervención del páramo, al incluir relaciones de vecindad con diferentes niveles de significancia estadística (Li et al. 2017), convirtiéndose en una alternativa de clasificación de variables espaciales frente a la mayoría de métodos de clasificación usados en el análisis de vulnerabilidad ambiental basados en PCA como (Liu et al. 2020; Li et al. 2006; Nandy et al. 2015) o métodos de clasificación basados en la distribución (Song et al. 2010; Xiaolei et al. 2011; Pei et al. 2015). Los Hotspot identificados con este método pueden ser considerados como un marco alternativo espacialmente explícito para el establecimiento de la vulnerabilidad ambiental e integrados a propuestas de conservación ambiental.

Finalmente, otros tipos de metodologías propuestas para evaluar la vulnerabilidad ambiental, como Machine Learning (Jang et al. 2020) podrían a futuro implementarse como alternativa ya que en la actualidad uno de los limitante gira entorno a la cantidad de datos de validación cómo lo destaca (Luo et al. 2021).

#### **Análisis multicriterio y zonificación de la vulnerabilidad**

El AHP mostró ser un método idóneo para la integración de variables espaciales por medio del establecimiento de pesos de incidencia, debido a que se obtuvieron valores menores a 0,1 en el índice de inconsistencia, estando acordes con metodologías como la de (Xiaolei et al. 2011), (Liao et al. 2013), (Pei et al. 2015) y (Eguiguren-Velepucha et al. 2016).

En términos generales el factor con mayor peso corresponde a las condiciones abióticas en el componente de sensibilidad; esto puede estar relacionado a que dicho factor se encuentra ligado a las condiciones que determinan la vegetación del ecosistema, tales como pendientes, temperatura y disponibilidad de carbono y su relación con los servicios ecosistémico de regulación y abastecimiento hídrico y carbono en el suelo, sobre los cuales hay consenso sobre los posibles impactos a un cambio en la cobertura y uso del páramo (Cárdenas 2016). Por otro lado, el factor más determinante en términos de peso para la exposición corresponde a las actividades agropecuarias, coincidiendo con la hipótesis propuesta, debido a que el principal factor impulsor de cambio en la cobertura de suelo para los páramos en Colombia se debe al avance de la frontera agropecuaria tal y como lo establece (Vargas 2013) y en otros tipos de ecosistemas como lo encontrado por (Liao et al. 2013; Xiaolei et al. 2011; Song et al. 2010; Li et al. 2006). Finalmente, el factor con mayor peso para la resiliencia corresponde a la conectividad, siendo este factor

determinante en las estructuras ecosistémicas, conexiones funcionales y corredores ecológicos los cuales mejoran la capacidad de resiliencia de un ecosistema como lo establecen (De Lange et al. 2010; Yi & Jackson 2021).

Al igual que los trabajos de (Li et al. 2006), (Xiaolei et al. 2011) y (Hong et al. 2016), los tipos de vegetación e índices de vegetación y de paisaje provenientes de procesamiento de imágenes satelitales, fueron los factores más relevantes en el componente de sensibilidad. Esto se relaciona con el hecho 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 y una manera de entender el impacto de factores naturales y antrópicos (Perring et al. 2016). Adicionalmente, el cambio de uso del suelo es considerada como uno de los mayores factores de cambio de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como lo establece (Valencia et al. 2020) (IPBES. 2019), 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 TTVI.

Se resaltan las condiciones abióticas del ecosistema, como alturas, pendientes y temperaturas evaluadas también en otras investigaciones de vulnerabilidad ambiental (Li et al. 2006), (Cavazzana et al. 2016) y (Mohamed 2020), mostrando en nuestro 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. Respecto al carbono orgánico en el suelo, índice de humedad y cercanía a cuerpos de agua, a pesar de su poca representatividad en área, se consideraron variables de mayor peso por parte de los expertos, debido a la lenta recuperación de la materia orgánica en el suelo presente en los ecosistemas de paramo (Vargas 2013), y a la importancia del ecosistemas en la regulación y provisión hídrica como lo establece (Cárdenas 2016).

Los factores de exposición más relevantes identificados, coinciden con las presiones principales que sufre el ecosistema de paramo como la agricultura, ganadería y minería como lo establece (Vargas 2013; Calvo González 2006), y que también son determinantes en otros ecosistemas a nivel mundial (Choudhary et al. 2018), (Liao et al. 2013), (Xiaolei et al. 2011) y (Song et al. 2010). Las actividades agropecuarias fueron las que más impactan la vegetación natural tal como se concluye en estudios desarrollados por (Li et al. 2006), (Song et al. 2010), (Xiaolei et al. 2011), (Choudhary et al. 2018) y (Hong et al. 2016). Dentro de este componente, se evidenciaron limitantes asociadas con la escala

espacial y temporal de la información, coincidiendo con lo encontrado por (Yi & Jackson 2021) y (Adger 2006), quienes indican la dificultad de incorporar la información espacial asociada a dinámicas sociales y económicas (población, y producción), generalmente vinculadas como unidades de análisis político-administrativas que no representan la dinámica espacial y real de este componente. También los incendios tuvieron su mayor aporte a la vegetación de paramo y bosques, acorde a los disturbios ocasionados por quemas para la expansión agrícola como se plantea en el estudio de (Calvo González 2006).

El hecho 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 establece (Osorio Fernández 2015) y (Vargas 2013).

Si bien en la valoración de la resiliencia se incorporó la conectividad, esta variable presentó limitaciones dado que sólo considera la conectividad estructural basada en algoritmos de vecindades de píxeles y no en la modelación espacial de algún proceso ecológico relevante para el ecosistema de páramos y su vulnerabilidad como la regulación hídrica (Cárdenas 2016). (Yi & Jackson 2021), concluyeron en su investigación sobre resiliencia en los ecosistemas, que no existen métricas universales para determinar la recuperación de un ecosistema, y estas deben estar sujetas a la disponibilidad de mayor información multitemporal y de procesos ecológicos importantes para el ecosistema en el caso de la conectividad y de análisis de series de tiempo a partir de índices espectrales que evidencien procesos de recuperación degradación. Sin embargo, la inclusión de la conectividad como variable importante difiere con los estudios de (Eguiguren-Velepucha et al. 2016) y (Mohamed 2020), los cuales encontraron que la variable de mayor importancia y representatividad para la resiliencia, obedece a las figuras de protección. Particularmente en nuestro estudio, esto se puede explicar debido a que las figuras de protección presentes en el páramos de Pisba tales como el PNN tienen poca representación en términos de área, llegando a cubrir únicamente el 26% del área (Morales et al. 2007). Se resalta que todo el PNN de Pisba coincidió con los Coldspot 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 al. 2020) sobre la vulnerabilidad alta en alturas bajas.

La zonificación de la vulnerabilidad responde a la configuración y composición del paisaje, mostrando vulnerabilidad alta sobre la región occidental lo cual es consistente con la exposición de este borde a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, la presencia de minería, influencia de los centros poblados y la densidad de vías asociada a la fácil accesibilidad, patrones espaciales propios del uso de los páramos (Cabrera & Ramírez 2014; Cárdenas 2016) y factores que favorecen procesos de cambios de uso del suelo (Etter et al. 2020). Por su parte la vulnerabilidad media se encontró asociada igualmente a los bordes occidentales de paramo, y sobre pequeñas zonas en la región nor-oriental 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.

Como lo plantean (Turner et al. 2003) y (De Lange et al. 2010), dada la complejidad de las dinámicas humano-ambientales, es posible que existan otras variables y pesos que dependan del contexto específico de cada ecosistema y de cada complejo de páramos. Lo anterior refuerza lo encontrado en los estudios de (Guarderas et al. 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 et al. 2018), conllevando a inclusión y ponderación de un mayor peso a otro tipo de variables y factores.

Esta investigación indicó que la combinación de datos espaciales generados a partir de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, cartografía base y datos alfanuméricos asociados a la población y producción sirven en el diagnóstico de la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de páramo asociada a los usos del suelo en un nivel local, complementando otras metodologías de vulnerabilidad asociadas al cambio climático en páramos como los de (Cárdenas 2016; Jeanneth 2002; Valencia et al. 2020; Cresso et al. 2020).



## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

La metodología propuesta, es una alternativa para evaluar la vulnerabilidad ambiental en ecosistemas de páramos con base en el marco teórico de los componentes de sensibilidad, exposición y resiliencia, que considera tanto la inclusión sistemática de datos y técnicas espaciales aportadas por la Geomática, como análisis multicriterio para resolver problemas ambientales, facilitando la predicción de futuros impactos para la toma de decisiones en el marco de la protección, conservación y restauración del ecosistema de páramo.

Si bien se identifica la necesidad de metodologías cada vez más robustas sobre vulnerabilidad a nivel global y regional, sobretodo en ecosistemas que por sus condiciones de evolución son sensibles a presiones como el páramo, el marco propuesto es un avance para su mejoramiento, dado que aunque estos ecosistemas guarden características biofísicas y ecológicas similares, en el contexto de los páramos en Colombia pueden existir dinámicas intra-regionales que pueden incidir en la importancia y pesos tanto de variables como factores, especialmente relacionados con el entorno socio-económico.

El uso diferentes técnicas de análisis espacial y análisis multicriterio, es fundamental para abordar este tipo de estudios, lo que posibilita su réplica y aplicación a nivel de los ecosistemas de páramo en Colombia. La utilización de técnicas de análisis espacial aplicada a diferentes conjuntos de datos, se consideraron como buenos resultados para variables asociadas al estado del ecosistema y del paisaje, como las obtenidas haciendo uso de Random Forest o Kriging respectivamente. Para las variables construidas con datos alfanuméricos, como densidad poblacional y producción agropecuaria, si bien la escala de trabajo se reduce a nivel de vereda por el detalle de la información, se posibilitó su incorporación a la vulnerabilidad usando relaciones de vecindad que fueron las más adecuadas.

Consideramos que los procesos de estandarización fueron adecuados para el número de variables propuestas en este estudio, facilitando la identificación de la vulnerabilidad. El análisis de patrones aplicado, es una alternativa soportada en métodos cuantitativos de clasificación con soporte estadístico y a diferencia de otros métodos como asignación de cortes, Natural Breaks o Equal Break obedece más al comportamiento natural de la representación de la vulnerabilidad ambiental. Por su parte, el análisis de Hot Spot por Getis-Ord  $G_i^*$  tiene en cuenta no solo la distribución de los valores del índice, si no que

analiza la relación espacial de los valores, facilitando la obtención de clúster de valores altos y bajos, lo cual elimina datos atípicos y delimita las zonas vulnerables, pudiéndose utilizar no solo en estudios de vulnerabilidad ambiental, sino también posibilitando la utilización en cualquier investigación donde su resultado sea un índice continuo.

El análisis AHP demostró que sigue siendo un método viable a la hora del establecimiento de pesos de incidencia, donde las condiciones abióticas son las más sensibles debido a la vulnerabilidad de los recursos hídricos del páramo. Las actividades agropecuarias representan una variable importante respecto a la exposición debido a que el avance de la frontera agropecuaria es un impulsor de cambio de coberturas.

Pese a que la conectividad representa el factor más importante en la resiliencia, su estimación presentó falencias, dado que solo se consideraron análisis mediante algoritmos de vecindad entre vegetación natural, lo cual no representa un análisis completo de conexiones funcionales del ecosistema.

Los resultados indicaron que el Complejo de páramo de Pisba, presenta una vulnerabilidad alta y media en coberturas asociadas a cuerpos de agua, bosques y vegetación de páramo, donde las condiciones abióticas, actividades agropecuarias y conectividad fueron los factores más representativos para cada componente. La distribución de la vulnerabilidad ambiental en términos generales estuvo acorde a lo observado sobre el ecosistema, siendo consistente no solo con las condiciones del ecosistema, sino con las presiones antrópicas asociadas a la población circundante al páramo (bordes del complejo).

## 6.2 Recomendaciones

La evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas no es solo una problemática ambiental, sino que está muy asociada a problemáticas sociales, por lo cual el involucramiento de expertos locales y habitantes de la región es un aspecto fundamental a tener en cuenta en futuras implementaciones de la metodología, como en la investigación de (Malekmohammadi & Jahanishakib 2017) en la que se tuvieron en cuenta criterios locales. De igual forma, la escala temporal y espacial de las variables es un aspecto crítico en la formulación de metodologías de vulnerabilidad y es recomendable el análisis de series de tiempo que soportaran una mejor evaluación del tema, asociado principalmente al cambio de las presiones antrópicas relacionadas con la cobertura y usos del suelo.

Se recomienda emplear métodos para evaluar la colinealidad de las variables, lo cual podría reflejarse en una reducción bien sea de los factores o variables y por consiguiente en la asignación de pesos. Para la sensibilidad se sugiere considerar otras variables de estructura del paisaje tales como el efecto de borde asociado a los procesos ecológicos relacionados con el papel de la vegetación de páramos como la regulación hídrica y almacenamiento de carbono en el suelo; también se puede complementar las condiciones abióticas con datos de porosidad del suelo que contemplen la capacidad de retención hídrica.

Para la exposición se recomienda complementar a futuro con datos poblacionales y de producción más actualizados y de mejor resolución, así como datos de producción y población a futuro. En relación con la resiliencia, se sugiere ampliar el número de variables incorporando un índice multidimensional como el planteado por (Guarderas et al. 2021), que considere la resistencia del ecosistema y los diferentes tipos de vegetación frente a las perturbaciones e incorporar la conectividad funcional de procesos ecológicos asociados al recurso hídrico y contenido de carbono en el suelo, así como la incorporación de análisis multitemporales más robustos con mejor disponibilidad de imágenes satelitales para el caso de la recuperación.

Si bien el método de AHP mostró buenos resultados basándose en el índice de consistencia y pesos de las variables y factores, es importante para futuras investigaciones robustecer este método mediante la incorporación de más consultas de expertos, apoyada por consultas de la comunidad local, ya que estos actores brindarían una visión más objetiva de la realidad al ser los involucrados directos en la conservación y uso del ecosistema de páramo.

**A. Anexo: Matriz de correlación de variables.**

Componentes		Sensibilidad											Exposición								Resiliencia						
Factores		Estado de la vegetación		Estructura del paisaje				Condiciones abióticas del ecosistema					Población	Actividad minera		Infraestructuras		Actividades agropecuarias			Incendios	Zonas de protección	Índice de recuperación	Conectividad			
Variables		Índice de vegetación transformado Thiam's	Tipo de cobertura del suelo	Índice de diversidad de Shannon	Índice de agregación	Densidad de borde (ED)	Densidad de parches (PD)	Área promedio de parches (MPA)	Pendientes	Altura	Temperatura	Área de amortiguamiento de los Cuerpos de agua	Índice topográfico de humedad	Carbono Orgánico	Densidad poblacional	Distancia minería ilegal	títulos mineros	Distancia centros poblados	Distancia vías	Producción pecuaria	Producción agrícola	Distancia Usos del suelo agropecuarios	Frecuencia de incendios	Zonas de protección	Índice de recuperación	Conectividad	
Índice de vegetación	1,00																										
Tipo de cobertura del	0,16	1,00																									
Índice de diversidad de	- 0,02	0,19	1,00																								
Índice de agregación	- 0,05	0,30	0,10	1,00																							
Densidad de borde (ED)	- 0,08	0,28	0,39	0,16	1,00																						
Densidad de parches (PD)	- 0,02	0,16	0,43	0,10	0,63	1,00																					
Área promedio de parche (MPA)	0,00	0,61	0,42	0,34	0,60	0,44	1,00																				
Pendientes	- 0,02	- 0,01	- 0,06	0,76	- 0,06	- 0,03	- 0,04	1,00																			
Altura	- 0,20	- 0,01	0,09	0,86	0,06	0,07	0,05	0,82	1,00																		
Temperatura	- 0,31	0,00	0,26	- 0,01	0,18	0,17	0,14	- 0,04	0,16	1,00																	
Área de amortiguamiento de los Cuerpos de agua	- 0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05	0,03	0,01	- 0,01	1,00																
Índice topográfico de humedad	- 0,08	0,09	0,02	0,01	0,01	- 0,01	0,07	0,23	0,01	- 0,03	0,16	1,00															
Carbono Orgánico	- 0,11	0,15	0,29	0,05	0,24	0,25	0,29	- 0,02	0,05	0,07	0,00	0,00	1,00														
Densidad poblacional	0,18	0,19	0,21	0,12	0,12	0,14	0,22	- 0,01	- 0,02	- 0,09	- 0,01	- 0,00	0,21	1,00													
Distancia minería ilegal	- 0,05	0,01	0,02	0,90	0,01	0,01	0,02	0,85	0,95	- 0,00	0,00	- 0,01	0,00	0,02	1,00												
títulos mineros	- 0,01	0,06	0,24	0,04	0,10	0,15	0,11	- 0,00	0,03	0,08	- 0,00	0,02	0,23	0,14	0,01	1,00											
Distancia centros poblados	- 0,03	0,01	0,03	0,90	0,02	0,03	0,03	0,84	0,94	0,00	0,00	- 0,01	0,01	0,05	0,98	0,03	1,00										
Distancia vías	- 0,01	0,06	0,04	0,87	0,02	0,02	0,05	0,81	0,89	- 0,02	0,01	0,00	- 0,00	0,04	0,93	0,01	0,92	1,00									
Producción pecuaria	0,26	0,28	0,14	0,15	0,12	0,07	0,27	- 0,03	- 0,07	- 0,13	- 0,01	- 0,01	0,11	0,46	0,01	0,18	0,02	0,02	1,00								
Producción agrícola	0,16	0,12	0,21	0,08	0,11	0,16	0,17	0,00	- 0,03	- 0,09	0,00	0,01	0,29	0,51	0,01	0,21	0,02	0,01	0,25	1,00							
Distancia Usos del suelo agropecuarios	0,02	0,38	0,11	0,86	0,28	0,13	0,41	0,61	0,70	- 0,01	0,03	0,03	0,10	0,14	0,75	0,04	0,75	0,73	0,26	0,09	1,00						
Frecuencia de incendios	0,03	- 0,08	- 0,06	- 0,05	- 0,08	- 0,05	- 0,11	- 0,00	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,10	- 0,07	- 0,01	- 0,08	- 0,01	- 0,00	- 0,15	- 0,09	- 0,10	1,00					
Zonas de protección	- 0,01	- 0,27	- 0,19	- 0,16	- 0,14	- 0,07	- 0,30	0,00	- 0,05	- 0,18	- 0,00	- 0,03	- 0,05	- 0,10	- 0,02	- 0,13	- 0,02	- 0,05	- 0,27	- 0,09	- 0,21	0,01	1,00				
Índice de recuperación	- 0,29	- 0,35	- 0,08	- 0,72	- 0,13	- 0,04	- 0,29	- 0,20	- 0,20	- 0,00	- 0,05	- 0,02	- 0,02	- 0,12	- 0,23	- 0,04	- 0,25	- 0,24	- 0,23	- 0,13	- 0,53	0,05	0,17	1,00			
Conectividad	0,03	- 0,30	- 0,59	- 0,24	- 0,60	- 0,52	- 0,58	0,03	- 0,10	- 0,17	- 0,06	- 0,03	- 0,29	- 0,17	- 0,05	- 0,13	- 0,07	- 0,08	- 0,15	- 0,16	- 0,30	0,08	0,16	0,12	1,00		

## B. Anexo: Distribución de áreas para los índices de las variables

Componentes	Factores	Variables	Valores bajos del índice (0-0,33)	Valores medios del índice (0,34-0,66)	Valores altos del índice (0,67-1)	Media	
Sensibilidad	Estado de la vegetación	Índice de vegetación transformado Thiam's	1,7% (0-0,33)	98,1% (0,34-0,66)	0,3% (0,67-1)	0,48	
		Tipo de cobertura del suelo	83,16% (Cuerpos de agua, Vegetación de paramo, Bosques)	0,63% (Plantaciones forestales)	16,21% (Pastos y cultivos, Suelo desnudo)	0,25	
	Estructura del paisaje	Índice de diversidad de Shannon	78,9% (1-2,5)	15,3% (2,5-4)	5,8% (4-5)	0,16 (1,39)	
		Índice de agregación	80,06% (0-33)	7,06% (34-66)	12,88% (67-100)	0,17	
		Densidad de borde (ED)	77,4% (0-33)	11,7% (34-66)	10,9% (67-100)	0,18	
		Densidad de parches (PD)	95% (0-0,33)	2,5% (0,34-0,66)	2,5% (0,67-1)	0,05	
		Área promedio de parche (MPA)	65,5%(2660-8100m <sup>2</sup> )	11,1%(1330-2660m <sup>2</sup> )	23,4%(0-1330m <sup>2</sup> )	0,289 (4100m <sup>2</sup> )	
	Condiciones abióticas del ecosistema	Pendientes	41,25% (>30°)	37,93% (15-30°)	20,83% (0-15°)	0,4 (25°)	
		Altura	87,36% (>3100 msnm)	8,26% (2800-3100 msnm)	4,38% (<2800 msnm)	0,11 (3400msnm)	
		Temperatura	90,4% (<9° C)	8,5% (9-12, 5° C)	1% (>12,5 ° C)	0,09(9, 5° C)	
		Área de amortiguamiento de los Cuerpos de agua	96,2%(>30 m)	1,2%(15-30m)	2,6%(0-15m)	0,035 (364m)	
		Índice topográfico de humedad	78,4% (13,4-20)	18,4%(6,7-13,4)	3,1% (0-6,7)	0,23 (6,7)	
		Carbono Orgánico	15% (108,7-133 ton/ha)	46,2% (84,4-108,7 ton/ha)	38,8% (60-84,4 ton/ha)	0,58 (95,5 ton/ha)	
	Exposición	Población	Densidad poblacional	98,6% (<0,4 p/ha)	1% (0,4-0,8 p/ha)	0,4% (0,8 - 1,2 p/ha)	0,04 (0,2 p/ha)

	Actividad minera	Distancia minería ilegal	98,5% (>1,5 km)	0,8% (0,5 - 1,5 km)	0,7% (<0,5 km)	0,01 (20km)	
		títulos mineros	88,2% (Sin títulos mineros)	0%(NA)	11,8% (Con títulos mineros)	0,12	
	Infraestructuras	Distancia centros poblados	95,6% (>4 km)	2,8%(2-4km)	1,6%(<2km)	0,04 (9km)	
		Distancia vías	85,5% (>300 m)	5,3% (150-300 m)	8,2%(>150m)	0,11 (5391m)	
	Actividades agropecuarias	Producción pecuaria	81,8% (<0,23 g/ha)	13% (0,23-0,47 g/ha)	5,3% (0,47-0,7 g/ha)	0,18 (0,11 g/ha)	
		Producción agrícola	94,1% (0-18,3%)	3% (18,3 -36,7 %)	2,9% (36,7 - 55 %)	0,09(18,4%)	
		Distancia Usos del suelo agropecuarios	57,7% (> 500 m)	7,7% (250-500 m)	34,6% (0-250 m)	0,38 (780m)	
	Incendios	Frecuencia de incendios	98,6% (0 incendios/ 5 años)	1,1% (1-2 incendios/5 años)	0,3% (3-4 incendios/ 5 años)	0,02(0,01 incendios/ 5 años)	
	Resiliencia	Zonas de protección	Zonas de protección	28,2% (Sin zonas de protección)	49,2% (Zonas de protección POMCA)	22,7% (PNN Pisba)	0,52
		índice de recuperación	índice de recuperación	5,3% (< -50 %)	21,7% (0-50%)	73% (0-20%)	0,7 (0,5%)
Conectividad		Conectividad	1,6% (0-0,33)	10,7% (0,34-0,66)	87,7% (0,67-1)	0,68	

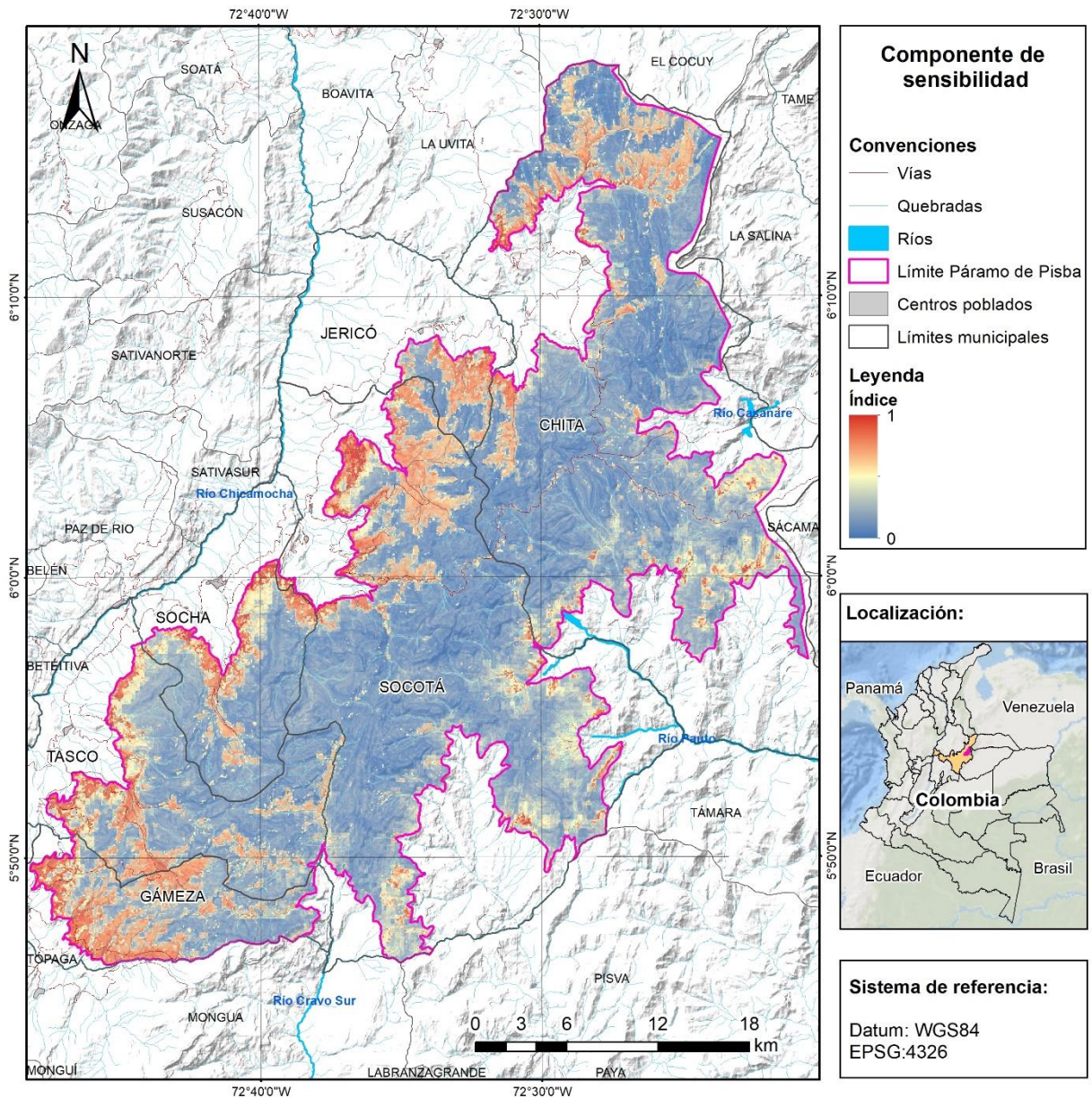
### C. Anexo: Media de los factores para cada cobertura

	Factores	Coberturas	MIN	MAX	MEDIA	STD
Exposición	Infraestructuras	Bosque denso	0,00	1,00	0,04	0,13
		Cuerpos de agua	0,00	1,00	0,02	0,10
		pastos y cultivos	0,00	1,00	0,15	0,22
		plantaciones forestales	0,00	1,00	0,14	0,21
		suelo desnudo	0,00	1,00	0,20	0,27
		Vegetación paramo	0,00	1,00	0,07	0,15
	Minería	Bosque denso	0,00	1,00	0,08	0,17
		Cuerpos de agua	0,00	0,41	0,00	0,04
		pastos y cultivos	0,00	1,00	0,08	0,18
		plantaciones forestales	0,00	1,00	0,17	0,22
		suelo desnudo	0,00	1,00	0,14	0,25
		Vegetación paramo	0,00	1,00	0,04	0,13
	Actividades agro	Bosque denso	0,00	0,85	0,14	0,18
		Cuerpos de agua	0,00	0,01	0,00	0,09
		pastos y cultivos	0,00	0,85	0,59	0,13
		plantaciones forestales	0,00	0,85	0,34	0,25
		suelo desnudo	0,00	0,81	0,36	0,24
		Vegetación paramo	0,00	0,85	0,20	0,22
	Incendios	Bosque denso	0,00	1,00	0,02	0,08
		Cuerpos de agua	0,00	0,20	0,00	0,13
		pastos y cultivos	0,00	0,75	0,01	0,06
		plantaciones forestales	0,00	0,25	0,00	0,01
		suelo desnudo	0,00	0,50	0,03	0,10
		Vegetación paramo	0,00	1,00	0,03	0,09
Población	Bosque denso	0,00	1,00	0,00	0,03	
	Cuerpos de agua	0,00	0,13	0,03	0,05	
	pastos y cultivos	0,00	1,00	0,07	0,13	
	plantaciones forestales	0,00	1,00	0,11	0,18	
	suelo desnudo	0,00	0,73	0,06	0,10	
	Vegetación paramo	0,00	1,00	0,03	0,08	
Resiliencia	Recuperación	Bosque denso	0,76	1,00	0,90	0,01
		Cuerpos de agua	0,07	1,00	0,82	0,18
		pastos y cultivos	0,00	0,30	0,10	0,04

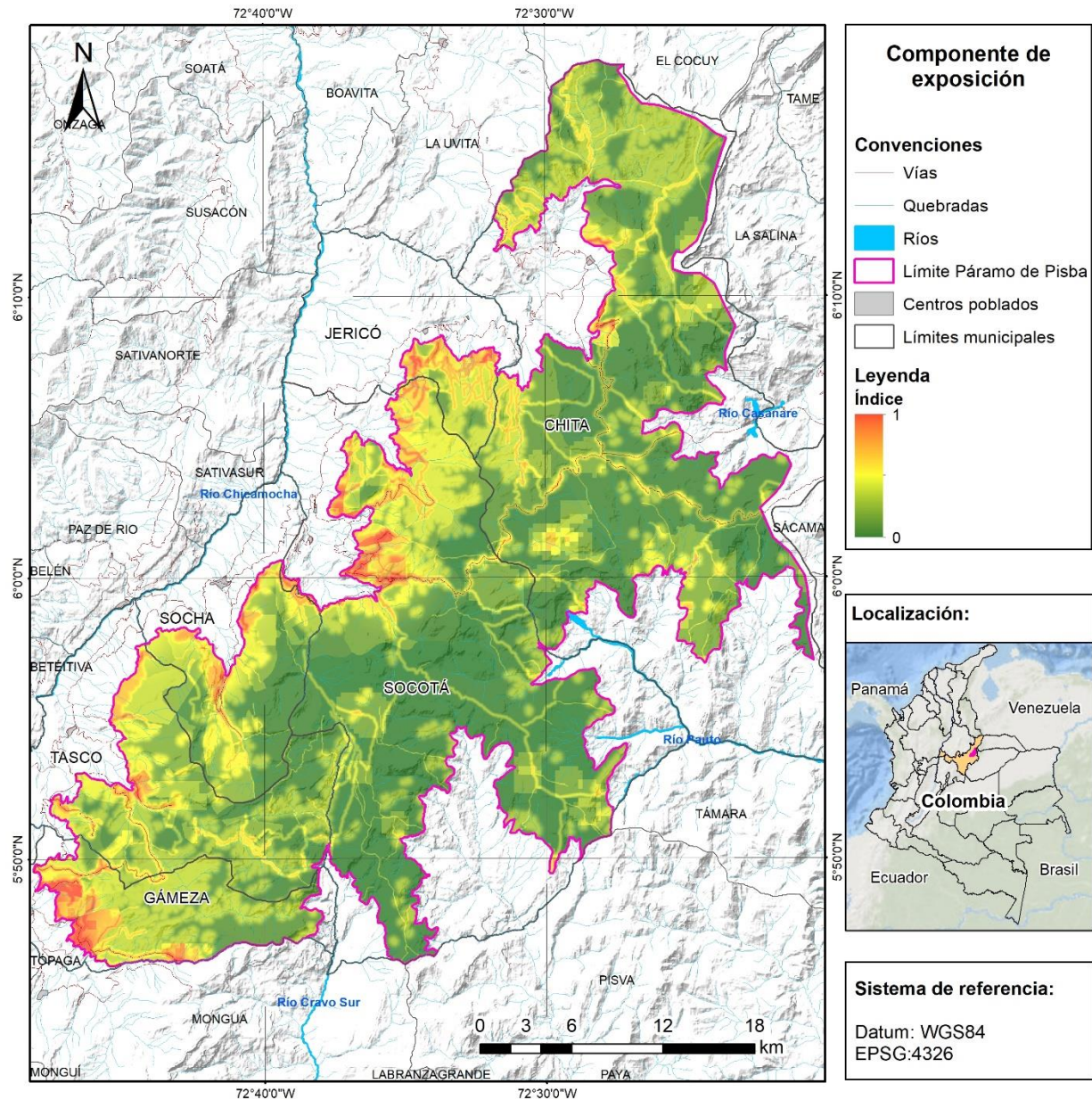
		plantaciones forestales	0,00	0,50	0,30	0,02	
		suelo desnudo	0,00	1,00	0,30	0,07	
		Vegetación paramo	0,09	1,00	0,80	0,02	
	Protección	Bosque denso	0,00	1,00	0,45	0,44	
		Cuerpos de agua	0,00	1,00	0,27	0,38	
		pastos y cultivos	0,00	1,00	0,30	0,34	
		plantaciones forestales	0,00	1,00	0,50	0,28	
		suelo desnudo	0,00	1,00	0,39	0,29	
		Vegetación paramo	0,00	1,00	0,58	0,33	
	Conectividad	Bosque denso	0,00	1,00	0,86	0,18	
		Cuerpos de agua	0,00	1,00	0,88	0,15	
		pastos y cultivos	0,00	0,40	0,20	0,18	
		plantaciones forestales	0,00	0,95	0,44	0,17	
		suelo desnudo	0,00	1,00	0,46	0,20	
		Vegetación paramo	0,00	1,00	0,91	0,16	
	Sensibilidad	Estructura del paisaje	Bosque denso	0,00	1,00	0,20	0,19
			Cuerpos de agua	0,00	0,89	0,16	0,17
			pastos y cultivos	0,00	1,00	0,45	0,18
plantaciones forestales			0,02	1,00	0,67	0,23	
suelo desnudo			0,01	1,00	0,57	0,26	
Vegetación paramo			0,00	1,00	0,21	0,18	
Estado de la vegetación		Bosque denso	0,12	0,85	0,22	0,05	
		Cuerpos de agua	0,00	0,84	0,26	0,05	
		pastos y cultivos	0,15	0,88	0,74	0,15	
		plantaciones forestales	0,17	0,83	0,61	0,13	
		suelo desnudo	0,20	0,85	0,70	0,15	
		Vegetación paramo	0,03	0,87	0,28	0,08	
Condiciones abióticas		Bosque denso	0,05	0,84	0,32	0,10	
		Cuerpos de agua	0,09	0,84	0,47	0,21	
		pastos y cultivos	0,01	0,84	0,27	0,10	
		plantaciones forestales	0,10	0,83	0,32	0,09	
		suelo desnudo	0,01	0,74	0,27	0,13	
		Vegetación paramo	0,01	0,84	0,24	0,09	



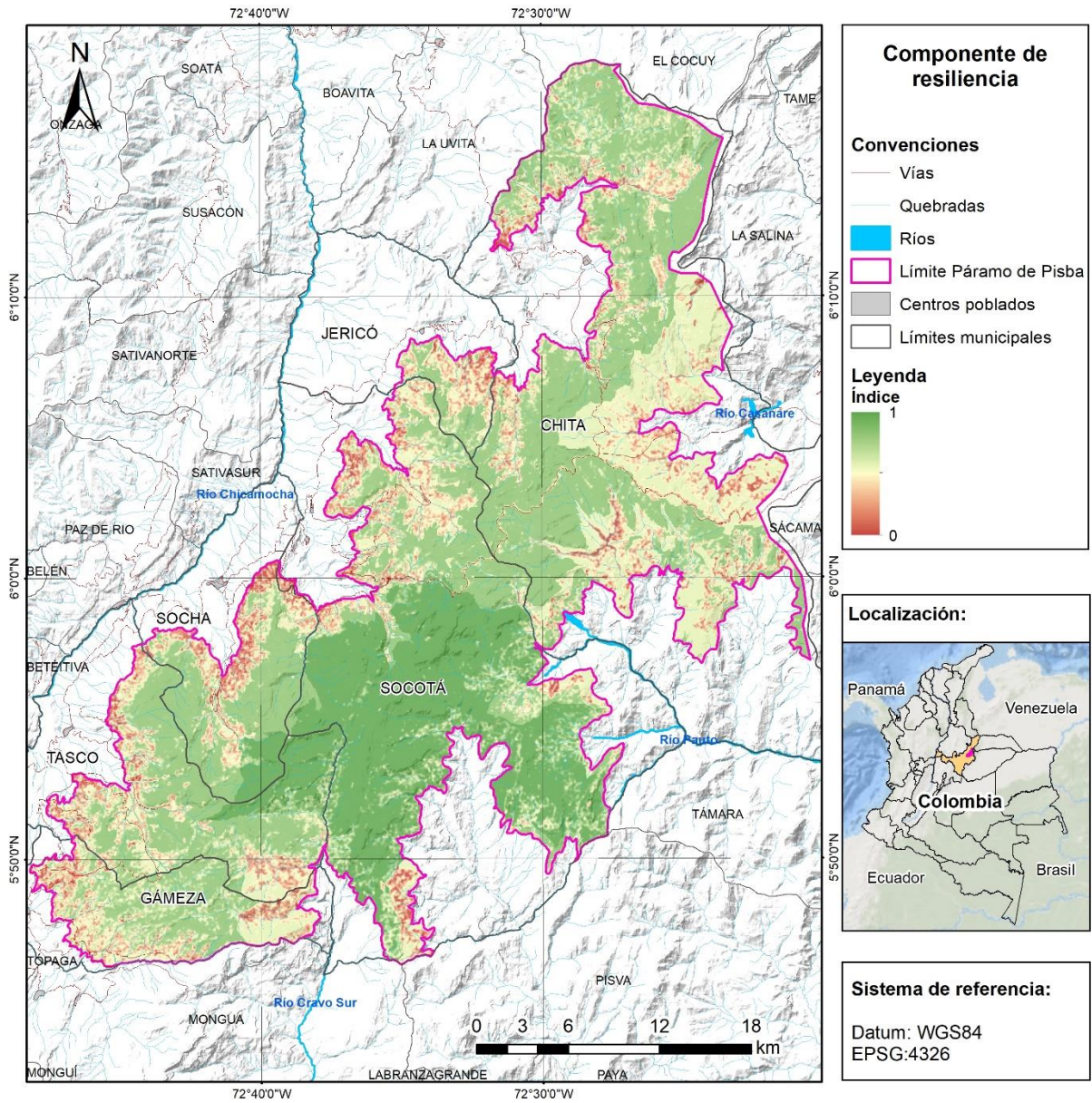
## D.Anexo: Mapas componentes.











## Bibliografía

- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), pp.268–281.  
Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378006000422>.
- Adriano Coronel, 2012. GESTIÓN DE RIESGOS en Gestión de proyectos. *Wiki-EOI*.
- Aryafar, A., Yousefi, S. & Doulati Ardejani, F., 2013. The weight of interaction of mining activities: Groundwater in environmental impact assessment using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). *Environmental Earth Sciences*, 68(8), pp.2313–2324.
- Ascough, J.C. et al., 2008. Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecological Modelling*, 219(3–4), pp.383–399.
- Awange, J.L. & Kyalo Kiema, J.B., 2013. *Environmental Geoinformatics*, Available at: <http://www.springer.com/series/3234> <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-34085-7>.
- Bagdavičiute, I. & Valiunas, J., 2013. GIS-based land suitability analysis integrating multi-criteria evaluation for the allocation of potential pollution sources. *Environmental Earth Sciences*, 68(6), pp.1797–1812.
- Bar, S., Parida, B.R. & Pandey, A.C., 2020. Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18(January), p.100324. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100324>.
- Barredo, J.I. & Bosque-Sendra, J., 1998. Multi-criteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, 5(4), pp.313–327.
- Baxter, M.J., 1979. THE APPLICATION OF LOGIT REGRESSION ANALYSIS TO PRODUCTION-CONSTRAINED GRAVITY MODELS\*. *Journal of Regional Science*, 19(2), pp.171–177. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9787.1979.tb00583.x> [Accessed September 26, 2020].
- Bocco, G., Mendoza, M. & Masera, O.R., 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de

- deforestación. *Investigaciones Geograficas*, 44, pp.18–38.
- Bourgoin, C. et al., 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(July 2019), p.101958. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101958>.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, pp.1–122.
- Cabrera, M. & Ramírez, W., 2014. *Restauración ecológica de los páramos en Colombia: transformación y herramientas para su conservación*,
- Calvo González, J., 2006. La Fragilidad de Páramos. , (June), pp.123–144.
- CAR, C., 2018. *Guía ilustrativa sobre Analisis de la vulnerabilidad territorial ante el cambio climatico*, Available at: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5cc8af9bc943b.pdf>.
- Cárdenas, M.F., 2016. Ecohydrology of paramos in Colombia: vulnerability to climate change and land use. , p.139. Available at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/56394/>.
- Cavazzana, G.H. et al., 2016. Natural and environmental vulnerability along the touristic “Estradas parque pantanal” by GIS algebraic mapping. In *Handbook of Environmental Chemistry*. Springer Verlag, pp. 209–226. Available at: [https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007/698\\_2014\\_328](https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007/698_2014_328) [Accessed September 27, 2020].
- Choudhary, K., Boori, M.S. & Kupriyanov, A., 2018. Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan, Russia. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(2), pp.139–147. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.05.003>.
- Cinner, J.E. et al., 2013. Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PloS one*, 8(9).
- Correa Ayram, C.A. et al., 2020. Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117(June), p.106630. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>.
- Cresso, M. et al., 2020. Future Climate Change Renders Unsuitable Conditions for Paramo Ecosystems in Colombia. *Sustainability*, 12(20), p.8373. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8373> [Accessed November 15, 2020].
- Duguy, B. et al., 2012. Modelling the ecological vulnerability to forest fires in

- mediterranean ecosystems using geographic information technologies. *Environmental Management*, 50(6), pp.1012–1026.
- Durán Gil, C.A., 2017. Análisis espacial de las condiciones de vulnerabilidad social, económica, física y ambiental en el territorio colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), pp.11–32.
- Eastman, R., 2012. IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. *Clark University*, 53(9), p.321.
- Echeverría, M., Rosero, C. & Bravo, L., 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 Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 20(39), pp.137–148.
- Eguiguren-Velepucha, P.A. et al., 2016. Tropical ecosystems vulnerability to climate change in southern Ecuador. *Tropical Conservation Science*, 9(4), p.194008291666800. Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1940082916668007> [Accessed November 15, 2020].
- Elisa Zanella, M., Wanderley Correia Dantas, E. & Luís Sampaio Olímpio, J., 2012. a Vulnerabilidade Natural E Ambiental Do Município De Fortaleza/Ce. *Boletim Goiano de Geografia*, 31(2), pp.13–27.
- ESRI, 2016. Comprender el análisis de distancia euclidiana—Ayuda. *ArcGIS for Desktop*. Available at: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/understanding-euclidean-distance-analysis.htm> [Accessed July 14, 2022].
- Etter, A. et al., 2020. Assessing restoration priorities for high-risk ecosystems: An application of the IUCN red list of ecosystems. *Land Use Policy*, 99(42), p.104874. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104874>.
- Fischer, M. & Getis, A., 1997. Recent Developments in Spatial Analysis – Spatial Statistics, Behavioural Modelling and Computational Intelligence. , (February 2016), p.433pp.
- Galik, E., 2013. *Tecnología del Sistema de Información Geográfica (SIG)*,
- Garavito, G., Gómez Zárate, D.P. & Palacio Tamayo, D., 2018. Gobernanza territorial en los páramos Chingaza y Sumapaz-Cruz Verde. Una comparación de sus principales actores y problemáticas. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), pp.11–30.

- Gerardo, López, E. & Mendoza, Manuel, B., 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso de suelo. Estudio de caso de la Ciudad de Morelia. *Investigaciones geográficas*, 28(45), p.134. Available at: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000666406&lang=es&site=eds-live>.
- Getis, A., 1995. Cliff, A.D. and Ord, J.K. 1973: Spatial autocorrelation. London: Pion. *Progress in Human Geography*, 19(2), pp.245–249. Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913259501900205> [Accessed September 26, 2020].
- Gomarasca, M.A., 2010. Basics of geomatics. *Applied Geomatics*, 2(3), pp.137–146.
- Guarderas, P., Smith, F. & Dufrene, M., 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 Land use transitions and drivers of change in a highland landscape of northern Ecuador.
- He, H.S., DeZonia, B.E. & Mladenoff, D.J., 2001. Erratum: An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes (*Landscape Ecology* (200) 15 (591-601)). *Landscape Ecology*, 16(1), p.87.
- Hong, W. et al., 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, pp.540–547. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.010>. [Accessed November 15, 2020].
- Huang, P.H., Tsai, J.S. & Lin, W.T., 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(1–4), pp.141–158.
- IDEAM, 2012. *Fuertes impactos del cambio climático en los páramos de Colombia*, Bogotá.
- Ippolito, A. et al., 2010. Ecological vulnerability analysis: A river basin case study. *Science of the Total Environment*, 408(18), pp.3880–3890. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.002>.
- Jang, W.S., Engel, B. & Yeum, C.M., 2020. Integrated environmental modeling for efficient aquifer vulnerability assessment using machine learning. *Environmental*

- Modelling & Software*, 124, p.104602.
- Jeanneth, H., 2002. Aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando SIG. *Meteorología Colombiana*, 6, pp.55–63.
- Jones, D. & Tamiz, M., 2016. *Multiple criteria Decision Analysis*,
- Jonse, a P.C. & Coutinho, L.C., 2016. Remote Sensing and Spatial Decision Support System. *Comparative and General Pharmacology*, 00(1), pp.17–19.
- Juzga, M.A., 2016. COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN EL CERRO DE LA CONEJERA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ. , p.2016.
- Kangas, J. et al., 2000. Improving the quality of landscape ecological forest planning by utilising advanced decision-support tools. *Forest Ecology and Management*, 132(2–3), pp.157–171.
- Khan, S., 2012. Vulnerability assessments and their planning implications: A case study of the Hutt Valley, New Zealand. *Natural Hazards*, 64(2), pp.1587–1607.
- Kia, M.B. et al., 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(1), pp.251–264.
- De Lange, H.J. et al., 2010. Ecological vulnerability in risk assessment - A review and perspectives. *Science of the Total Environment*, 408(18), pp.3871–3879. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.009>.
- Li, A. et al., 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), pp.175–187.
- Li, J. & Heap, A.D., 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Australian Geological Survey Organisation, GeoCat# 68(2008/23)*, p.154.
- Li, Y. et al., 2017. Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting. *Journal of Geographical Sciences*, 27(6), pp.681–696.
- Liao, X., Li, W. & Hou, J., 2013. Application of GIS Based Ecological Vulnerability Evaluation in Environmental Impact Assessment of Master Plan of Coal Mining Area. *Procedia Environmental Sciences*, 18, pp.271–276. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.035>.
- Liu, Y. et al., 2020. Variability in Regional Ecological Vulnerability: A Case Study of Sichuan Province, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, pp.1–13. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00295-6> [Accessed November 15,



2020].

- Lollino, G. et al., 2015. Slope Stability Analyses of the Proposed Reconstituted Slope of the Quarry Heights Drive Landslide, Durban, South Africa. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*, 2, pp.1–2177.
- Longley, P.A. et al., 2005. *Geographical Information Systems and Science*, Available at: [http://www.amazon.com/Geographic-Information-Systems-Science-Longley/dp/0470870001/ref=sr\\_1\\_2?ie=UTF8&qid=1430849641&sr=8-2&keywords=Geographical+Information+Systems+and+Science+longley+2005](http://www.amazon.com/Geographic-Information-Systems-Science-Longley/dp/0470870001/ref=sr_1_2?ie=UTF8&qid=1430849641&sr=8-2&keywords=Geographical+Information+Systems+and+Science+longley+2005).
- Luo, D., Caldas, M.M. & Goodin, D.G., 2021. Estimating environmental vulnerability in the Cerrado with machine learning and Twitter data. *Journal of Environmental Management*, 289, p.112502.
- Malczewski, J., 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*,
- Malekmohammadi, B. & Jahanishakib, F., 2017. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model. *Ecological Indicators*, 82(July), pp.293–303. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.060>.
- Mattivi, P. et al., 2019. TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2019 4:1, 4(1), pp.1–12. Available at: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-019-0066-y> [Accessed July 14, 2022].
- Meneses Moreno, L.H. et al., 2006. Plan De Manejo Parque Nacional Natural. , p.313.
- Mercier, A. et al., 2019. Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest–Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 979, 11(8), p.979. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/8/979/htm> [Accessed March 30, 2022].
- Ministerio Medio del Medio Ambiente, 2002. Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de alta montaña. *The Journal of Rural Health*, 11(3), pp.177–184.
- Mohamed, S.A., 2020. Coastal vulnerability assessment using GIS-Based multicriteria analysis of Alexandria-northwestern Nile Delta, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 163, p.103751. Available at: [https://www.sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S1464343X20300029](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S1464343X20300029) [Accessed September 27, 2020].

- Moizo Marrubio, P., 2004. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (4), p.10.
- Morales, M. et al., 2007. *Atlas de páramos de Colombia*, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Available at: <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35044#.YoOwPRqwbuE.mendeley>.
- Moreno Ortigón, C.D. & Palma Barragan, J.D., 2016. Vulnerabilidad Ecológica Del Complejo De Páramos Chilí-Barragán a Los Incrementos De Temperatura En Un Escenario De Cambio Climático. , p.307.
- Naciones Unidas, 2009. 2009 UNISDR Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR)*, p.43.
- Nandy, S. et al., 2015. Environmental vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India. *Ecological Indicators*, 57, pp.182–195. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.024>.
- Nguyen, K.A. & Liou, Y.A., 2019. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. *Science of the Total Environment*, 664, pp.995–1004. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.407>.
- Niu, L. et al., 2021. Degradation of river ecological quality in Tibet plateau with overgrazing: A quantitative assessment using biotic integrity index improved by random forest. *Ecological Indicators*, 120, p.106948.
- Omann, I., Stocker, A. & Jäger, J., 2009. Climate change as a threat to biodiversity: An application of the DPSIR approach. *Ecological Economics*, 69(1), pp.24–31. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.01.003>.
- Osorio Fernández, A.Y., 2015. Explotación minera en el páramo de Pisba-Boyacá. *Abadín J (2007). Agricultura sostenible en los Andes Tropicales. Importancia de la Materia Orgánica en la conservación de la fertilidad del suelo*, pp.1–21. Available at: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/7798#.XoJMWjUEz2l.mendeley>.
- Palacios Saldaña, R. & Pacheco Bonrostro, J., 2016. Los métodos de decisión multicriterio discretos. Un punto de vista racional aplicado a la toma de decisiones. *Anáhuac Journal*, 16(1), pp.47–78. Available at: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=126288689&lang=>

es&site=eds-live.

- Pei, H. et al., 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(2), pp.1449–1461. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4134-z>.
- Perring, M.P. et al., 2016. Global environmental change effects on ecosystems: The importance of land-use legacies. *Global Change Biology*, 22(4), pp.1361–1371.
- Peyre, G. et al., 2021. Mapping the páramo land-cover in the Northern Andes. *International Journal of Remote Sensing*, 42(20), pp.7777–7797. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2021.1964709> [Accessed March 30, 2022].
- Rezaei, F., Safavi, H.R. & Ahmadi, A., 2013. Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: A case study in the zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental Management*, 51(1), pp.267–277.
- Riitters, K. et al., 2000. Global-scale patterns of forest fragmentation. *Ecology and Society*, 4(2).
- Rivera, D. & Rodríguez, C., 2011. *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*,
- Rivera Ospina, D. & Rodríguez, C., 2011. *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*,
- Salvati, L. et al., 2013. Landscape changes and environmental quality: The evolution of land vulnerability and potential resilience to degradation in Italy. *Regional Environmental Change*, 13(6), pp.1223–1233.
- Sarmiento Pinzón, C.E. et al., 2013. *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia : actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*, Available at: <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31406#.XR0GZNq7t58.mendelej>.
- Senisterra, G.E., Gaspari, F.J. & Delgado, M.I., 2015. Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural, Argentina. , pp.38–58.
- SGC, 2017. *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*,
- Song, G. et al., 2010. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain

- region of China based on GIS and AHP method. *Procedia Environmental Sciences*, 2(5), pp.465–475. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.051>.
- Thiemann, F. & Sester, M., 2018. *Trends in Spatial Analysis and Modelling*.
- Turner, B.L. et al., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), pp.8074–8079. Available at: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1231335100>.
- Valencia, J.B. et al., 2020. Climate Vulnerability Assessment of the Espeletia Complex on Páramo Sky Islands in the Northern Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, p.565708. Available at: <https://www.igac.gov.co> [Accessed November 15, 2020].
- Vargas, O., 2013. Disturbios en los páramos andinos. , (March), pp.39–57. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/260438569\\_Disturbios\\_en\\_los\\_paramos\\_andinos](https://www.researchgate.net/publication/260438569_Disturbios_en_los_paramos_andinos).
- Xiaolei, Z. et al., 2011. Assessment of eco-environment vulnerability in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 63(4), pp.667–674. Available at: <https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007/s12665-010-0731-z> [Accessed September 27, 2020].
- Yang, F., Ma, C. & Fang, H., 2022. Simulation of critical transitions and vulnerability assessment of Tibetan Plateau key ecosystems. *Journal of Mountain Science* 2022 19:3, 19(3), pp.673–688. Available at: <https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007/s11629-021-6960-7> [Accessed March 30, 2022].
- Yang, S. et al., 2015. Screening of social vulnerability to natural hazards in China. *Natural Hazards*, 76(1), pp.1–18. Available at: <https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs11069-014-1225-1> [Accessed November 15, 2020].
- Yi, C. & Jackson, N., 2021. A review of measuring ecosystem resilience to disturbance. *Environmental Research Letters*, 16(5).
- Zadeh, L. a., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), pp.338–353.
- Zadeh, L.A., 1971. Fuzzy Semantics. *Information Sciences*, 3, pp.159–176.
- Zhang, X. et al., 2017. Ecological vulnerability assessment based on PSSR in Yellow River Delta. *Journal of Cleaner Production*, 167, pp.1106–1111. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.106>.

12C Metodología para evaluar la vulnerabilidad ambiental en los ecosistemas de paramo asociada a los usos del suelo: Caso de estudio complejo de páramos Pisba (Boyacá, Colombia)

---