



Evaluación de la vulnerabilidad generada por el turismo en el páramo del Valle de los frailejones mediante el uso de SIG en el municipio de Villamaría, Caldas

David Gallego García

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

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

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

2025

Cita	(Gallego García, 2025)
Referencia	Gallego García, D. (2025). <i>Evaluación de la vulnerabilidad generada por el turismo en el páramo del Valle de los frailejones mediante el uso de SIG en el municipio de Villamaría, Caldas</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXX

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres, **Carlos Hernán Gallego** y **María Patricia García**, por ser el cimiento de mi vida, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la honestidad y el amor incondicional.

A mi esposa, **Andrea López**, por su apoyo constante, su paciencia infinita y por caminar a mi lado en cada paso de este camino. Gracias por sostener mis días con tu amor.

A mis hijos, **Benjamín**, **Joaquín** y **Amelia**, porque son mi inspiración más grande, mi fuerza y el motivo por el cual lucho diario para salir adelante.

Y en especial, a mi hijo mayor, **Benjamín**, que me acompaña desde el cielo. Tu luz me acompañara siempre, me guiara e impulsara a seguir adelante. Este logro también es para ti mi muchacho, con todo mi amor para ti mi angelito.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	13
Introducción	15
1 Planteamiento del problema	16
1.1 Descripción del área problemática	16
1.2 Formulación del problema	17
1.3 Antecedentes	18
3. Objetivos	23
3.1 Objetivo general	23
3.2 Objetivos específicos.....	24
4. Hipotesis.....	25
4.1 Hipótesis de trabajo	25
4.1.1 Hipótesis nula.....	25
4.1.1.1 Hipótesis alterna. Texto descriptivo inicia en la misma línea y continúa como párrafo normal APA.....	25
4.1.1.1.1 Variables. Texto descriptivo inicia en la misma línea y continúa como párrafo normal APA.....	25
5 Marco teórico	26
5.1 Ecología de los paramos.....	26
5.1.1 Definición de paramo y sus características principales	26
5.1.2 Factores ambientales que influyen en la distribución y estructura de los ecosistemas de páramo (temperatura, precipitación, altitud, etc.).....	28
5.1.3 Tipos de vegetación presentes en los páramos	28
5.1.4 Importancia de la dinámica del agua en los páramos	29
5.2 Importancia de los Frailejones	29

5.2.1 Descripción morfológica y fisiológica de los frailejones (Espeletia spp.).....	29
5.2.2 Funciones ecológicas de los frailejones en los ecosistemas de páramo.....	31
5.2.3 Interacciones planta-planta y planta-animal que involucran a los frailejones.	32
5.3 Impactos del Turismo.....	33
5.3.1 Tipos de actividades turísticas comunes en los páramos.....	33
5.3.2 Efectos del turismo en la biodiversidad y el ecosistema.....	35
5.3.3 Factores de impacto ambiental en áreas turísticas	37
5.4 Conservación y Manejo de Páramos	40
5.4.1 La provisión de servicios ecosistémicos	40
5.4.2 Identificar estrategias de conservación	41
6. Metodología	43
6.1 Enfoque metodológico	43
6.2 Tipo de estudio	43
6.3 Procedimiento.....	44
6.3.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.....	44
6.3.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo.	49
6.3.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo.....	60
7. Resultados	62
7.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.	62
7.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo	70
7.2.1 Generación de análisis base	70
7.2.2 Integración de Capas.....	95

7.2.3 Obtención mapa de vulnerabilidad	98
7.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo.....	105
8. Discusión.....	107
8.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.	108
8.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo	111
8.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo.....	114
9. Conclusiones	117
10. Recomendaciones.....	118
Referencias	119
Anexos.....	122

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Factores Ambientales</i>	28
Tabla 2 <i>Impactos del turismo en el medio ambiente</i>	36
Tabla 3 <i>Impactos ambientales medio biótico</i>	37
Tabla 4 <i>Impactos ambientales medio físico</i>	38
Tabla 5 <i>Impactos ambientales en el medio socio-económico-cultural</i>	39
Tabla 6 <i>Servicios Ecosistémicos</i>	41
Tabla 7 <i>Días de visita</i>	46
Tabla 8 <i>Descripción puntos de observación</i>	54
Tabla 9 <i>Ubicación puntos de observación</i>	55
Tabla 10 <i>Número de personas que ingresaron en la zona de estudio</i>	55
Tabla 11 <i>Total Acumulado de personas en los puntos de interés</i>	60
Tabla 12 <i>Cantidad de acciones registradas por día</i>	63
Tabla 13 <i>Porcentaje de Presencia de las acciones.</i>	64
Tabla 14 <i>Relación de las acciones y los impactos.</i>	67
Tabla 15 <i>Descripción de los valores de pendiente reclasificados</i>	82
Tabla 16 <i>Descripción de los valores de aspecto reclasificados</i>	86
Tabla 17 <i>Descripción de los valores de NDVI reclasificados</i>	89
Tabla 18 <i>Descripción de los valores de Densidad Kernel reclasificados</i>	93
Tabla 19 <i>Descripción de los valores de Vulnerabilidad reclasificados</i>	100

Lista de figuras

Figura 1 Morfología del frailejón <i>Espeletia pycnophylla</i> . 1) Hojas siempre verdes, 2) Fluorescencias, 3) Capa de hojas muertas, 4) Tallo, 5) Médula y 6) Raíz.....	30
Figura 2 Morfología en ambiente natural.....	31
Figura 3 Distribución de cinturón de ecosistemas alpinos (páramos) en Ecuador, Colombia y Venezuela. Estos fueron estimados usando la definición de zonas climáticas Köppen-Geiger	33
Figura 4 Mapa ecoturístico PNNN.....	34
Figura 5 Diagrama de flujo objetivo específico 1	45
Figura 6 Diagrama de flujo objetivo específico 2.....	49
Figura 7 Imagen Planet Scope.....	50
Figura 8 DEM 10m Zona de estudio.....	51
Figura 9 Puntos zona de estudio.....	52
Figura 10 Diagrama de flujo objetivo específico 3.....	61
Figura 11 Mapa de pendiente.....	72
Figura 12 Clasificación valores pendiente	72
Figura 13 Mapa de orientación solar.....	74
Figura 14 Clasificación valores aspecto.....	75
Figura 15 Mapa de Distribución de la Vegetación.....	76
Figura 16 Clasificación NDVI	76
Figura 17 Mapa de Concentración turística.	78
Figura 18 Clasificación Densidad Kernel.	79
Figura 19 Mapas Base.....	80
Figura 20 Mapa de pendiente reclasificada.....	81
Figura 21 Reclasificación valores pendiente.....	81
Figura 22 Mapa de orientación solar Reclasificado.....	85

Figura 23 Reclasificación valores aspecto	85
Figura 24 Mapa de Distribución Vegetal reclasificada.....	88
Figura 25 Reclasificación NDVI.....	89
Figura 26 Mapa de Concentración turística Reclasificada.....	92
Figura 27 Reclasificación Densidad Kernel.....	93
Figura 28 Mapas Reclasificados	98
Figura 29 Mapa de Vulnerabilidad	99
Figura 30 Mapa de Vulnerabilidad Reclasificado.....	100
Figura 31 Mapa de Vulnerabilidad Final	104
Figura 32 Mapa de vulnerabilidad intrínseca del estado de Yucatán.....	113
Figura 33 Mapa de Vulnerabilidad del Valle de los frailejones.....	114

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIG	Sistemas de Información Geográfica
msnm.	Metros sobre el nivel del mar
SINA	Sistema Nacional Ambiental de Colombia
AHP	Metodo de jerarquia Analitica
MSc	Magister Scientiae
Spp.	especies
PNNN	Parque Nacional Natural Los Nevados
DEM	Modelo Digital de Elevación
NDVI	Indice de Vegetación Normalizada
m	Metros

Resumen

El proyecto se centra en la evaluación de la vulnerabilidad en el Valle de los frailejones, una región de alta montaña ubicada en el municipio de Villamaría, Caldas, en Colombia. Este ecosistema de páramo, situado en la Cordillera Central de los Andes colombianos, es reconocido por su biodiversidad única y su importancia para la conservación de especies endémicas y amenazadas.

El proyecto empleo como metodología una combinación de técnicas de investigación cuantitativas y cualitativas para abordar de manera integral la vulnerabilidad de los frailejones en el contexto de las presiones antropogénicas, como lo es el turismo. Se realizó la identificación de puntos clave y conteo de individuos para identificar las zonas más vulnerables y la cantidad de personas que invaden dichos puntos clave.

Además, se llevó a cabo un análisis de las principales acciones detonantes de impactos ambientales asociados al turismo en las zonas donde se encuentran los frailejones, incluyendo la evaluación de las actividades turísticas. Con base en estos resultados, se desarrolló un mapa de vulnerabilidad geoespacial que permite identificar las áreas de mayor vulnerabilidad para los frailejones con el fin de proporcionar información clave para la toma de decisiones en la gestión y conservación de los ecosistemas de páramo en Colombia. Adicional se propusieron estrategias para disminuir la vulnerabilidad causada por los impactos ambientales del turismo en el valle de los frailejones.

Las conclusiones obtenidas en este proyecto subrayan varios aspectos clave relacionados con los impactos del turismo en los ecosistemas de páramo, en el Valle de los Frailejones. Las actividades turísticas, como el tránsito fuera de los senderos establecidos, el uso de vehículos motorizados en áreas sensibles y la alteración de la vegetación nativa, han demostrado ser factores significativos que contribuyen a la degradación de este ecosistema único. La falta de regulación y control en estas prácticas turísticas ha llevado a la pérdida de hábitats críticos, lo que a su vez ha generado una disminución en la biodiversidad de los frailejones y otras especies endémicas de la región.

El análisis geoespacial realizado permitió identificar áreas del ecosistema de páramo que son especialmente vulnerables a los impactos negativos del turismo, debido a su alta accesibilidad y atractivo para los visitantes. En particular, la superposición de actividades turísticas con hábitats sensibles aumenta la vulnerabilidad de estas zonas, afectando gravemente su integridad ecológica.

Asimismo, se ha constatado que la implementación de estrategias de conservación que involucren a las comunidades locales ha sido efectiva para reducir la vulnerabilidad ambiental. Estas estrategias fortalecen la gestión sostenible de los recursos naturales y favorecen el manejo de los ecosistemas de páramo. La educación ambiental y la sensibilización también juegan un papel crucial, ya que promueven prácticas turísticas responsables y aumentan la conciencia sobre la importancia de conservar estos

Palabras clave: (Páramo, Espeletia, Frailejones, Geoespacial, Colombia, Vulnerabilidad)

Abstract

This project focuses on the assessment of vulnerability in the Valle de los Frailejones, a high-mountain region located in the municipality of Villamaría, Caldas, Colombia. This páramo ecosystem, situated in the Central Andes of Colombia, is recognized for its unique biodiversity and its importance in the conservation of endemic and endangered species.

The methodology employed in this project combines both quantitative and qualitative research techniques to comprehensively address the vulnerability of frailejones in the context of anthropogenic pressures, such as tourism. Key points were identified, and individual counts were conducted to pinpoint the most vulnerable areas and the number of people invading these critical points.

Additionally, an analysis was performed to identify the main actions causing environmental impacts associated with tourism in areas where frailejones are found, including the evaluation of tourist activities. Based on these results, a geospatial vulnerability map was developed, allowing the identification of the most vulnerable areas for frailejones, providing essential information for decision-making in the management and conservation of páramo ecosystems in Colombia. Furthermore, strategies were proposed to reduce the vulnerability caused by the environmental impacts of tourism in the Valle de los Frailejones.

Finally, the conclusions drawn from this project highlight several key aspects related to the impacts of tourism on páramo ecosystems in the Valle de los Frailejones. Tourism activities, such as walking off established trails, the use of motorized vehicles in sensitive areas, and the alteration of native vegetation, have proven to be significant factors contributing to the degradation of this unique ecosystem. The lack of regulation and control in these tourist practices has led to the loss of critical habitats, which in turn has resulted in a decrease in biodiversity of frailejones and other endemic species in the region.

The geospatial analysis performed allowed the identification of areas within the páramo ecosystem that are particularly vulnerable to the negative impacts of tourism due to their high

accessibility and appeal to visitors. Specifically, the overlap of tourism activities with sensitive habitats increases the vulnerability of these areas, severely affecting their ecological integrity.

Furthermore, it has been found that the implementation of conservation strategies involving local communities has been effective in reducing environmental vulnerability. These strategies strengthen the sustainable management of natural resources and promote the stewardship of páramo ecosystems. Environmental education and awareness play a crucial role in promoting responsible tourism practices and raising awareness about the importance of conserving these vital ecosystems.

Keywords: (Páramo, Espeletia, Frailejones, Geospacial, Colombia, Vulnerability)

Introducción

Los páramos son ecosistemas estratégicos para la conservación de la biodiversidad y el suministro de servicios ecosistémicos vitales, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de especies endémicas. En Colombia, estos ecosistemas cubren aproximadamente el 2% del territorio nacional, pero proveen el 70% del agua que consume la población, convirtiéndolos en áreas prioritarias para la gestión ambiental. Uno de los ecosistemas más sensibles y relevantes dentro de estos territorios es el constituido por los frailejones (género *Espeletia*), especies fundamentales para la captura de humedad y la regulación del ciclo hídrico.

El páramo del Valle de los Frailejones, ubicado en el municipio de Villamaría, Caldas, forma parte del Parque Nacional Natural Los Nevados y ha ganado importancia no solo por su valor ecológico, sino también por el auge del turismo de naturaleza en los últimos años. Sin embargo, esta creciente actividad turística, si no es gestionada de manera adecuada, puede generar impactos negativos que incrementan la vulnerabilidad de los ecosistemas presentes, afectando la integridad de la cobertura vegetal, compactando los suelos, alterando la dinámica hídrica y fragmentando los hábitats.

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se presentan como herramientas eficaces para integrar múltiples variables espaciales y ambientales, permitiendo modelar y visualizar las zonas con mayor susceptibilidad a la degradación. A través del análisis multicriterio, es posible evaluar el nivel de riesgo que enfrenta el ecosistema de frailejones debido a factores como la cercanía a vías y senderos turísticos, la intensidad de uso de ciertas áreas, la pendiente del terreno y el tipo de cobertura del suelo.

Esta investigación tiene como propósito evaluar la vulnerabilidad ecológica asociada al turismo en el Valle de los Frailejones mediante el uso de SIG, con el fin de identificar zonas críticas y proponer herramientas útiles para la toma de decisiones en procesos de conservación, planificación territorial y turismo sostenible.

1. Planteamiento del problema

Este análisis busca identificar las principales amenazas, evaluar los impactos generados y proponer estrategias de conservación efectivas para mitigar los efectos negativos del turismo en un ecosistema tan vulnerable como es el páramo. Además, se analizarán las posibles soluciones a nivel local y regional que permitan equilibrar el aprovechamiento turístico con la protección del medio ambiente y la biodiversidad.

1.1 Descripción del área problemática

La pavimentación completa de la vía La Esperanza – Murillo terminada en septiembre de 2023 que se encuentra bajo el esquema APP N°8-2015 y que corresponde a la construcción y rehabilitación del corredor vial Ibagué-Honda, Cambao-Manizales (El cronista, 2023), ubicada entre los municipios de Manizales, Caldas y Murillo, Tolima ha resultado en un notable aumento del turismo a lo largo de este recorrido, que atraviesa el complejo de páramos. Dado que esta área está designada como zona de protección, resulta crucial evaluar el impacto que este incremento de visitantes está teniendo en el ecosistema, especialmente en el entorno del Valle de los frailejones, donde se concentra una gran afluencia de vehículos y turistas.

El Valle de los frailejones es un predio privado ubicado en el municipio de Villamaría, Caldas; a este predio se puede acceder por el corredor vial de Manizales-Murillo

En la actualidad, no se registra ningún mapa que muestre la vulnerabilidad que los frailejones pueden tener a causa del turismo indiscriminado y sin control que transita por esta vía. Dichas zonas no cuentan con un cerramiento o una señalización que indique que son zonas con acceso prohibido y que se encuentran bajo el esquema de la ley 1930 de 2018 por medio de la cual se dictan las disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia.

En el contexto nacional, la Ley 1930 de 2018 establece que los páramos son ecosistemas estratégicos que deben ser protegidos. A nivel internacional, los páramos son reconocidos como ecosistemas clave para la regulación hídrica, la biodiversidad y el cambio climático. Esta legislación refuerza la necesidad de evaluar los impactos del turismo en estas zonas para garantizar su conservación.

De acuerdo a la ley Los páramos deben ser entendidos como territorios de protección especial que integran componentes biológicos, geográficos, geológicos e hidrográficos, así como aspectos sociales y culturales (DAFP, 2018)

Las variables clave a identificar y analizar en este estudio son las acciones detonantes de impactos ambientales, como lo son la afluencia de turistas, la alteración de la vegetación, la contaminación (particularmente en términos de residuos sólidos y agua) para evaluar la vulnerabilidad geoespacial de los frailejones. Estas variables permiten abordar la relación de causa-efecto del impacto del turismo sobre la biodiversidad de la zona.

Una de las brechas que se van a abordar en este estudio es la falta de información precisa sobre la vulnerabilidad de los frailejones a los impactos del turismo en el Valle de los Frailejones. Además, se busca identificar la falta de infraestructura de control y gestión turística, como la señalización y la creación de zonas restringidas, para mitigar los efectos negativos del turismo sobre el ecosistema.

El período de observación abarcara los meses de agosto, septiembre y octubre de 2024, durante los cuales se realizarán salidas de campo de manera semanal, los fines de semana, para asegurar una cobertura temporal adecuada de las actividades turísticas.

1.2 Formulación del problema

"¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad geoespacial del Valle de los Frailejones ante el turismo?"

El Valle de los Frailejones, ubicado en el municipio de Villamaría, Caldas, forma parte de un ecosistema de páramo de gran importancia ecológica, conocido por su biodiversidad única y la presencia de especies endémicas como el frailejón (*Espeletia* spp.), que es crucial para la estabilidad del ecosistema. Este ecosistema se encuentra en una zona estratégica para la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, además de ser un área de alto valor tanto ecológico como cultural. Sin embargo, el aumento del turismo en la región, propiciado por la pavimentación reciente de la vía La Esperanza – Murillo, ha generado un incremento significativo en la afluencia de visitantes, vehículos y actividades recreativas, lo que ha comenzado a ejercer presión sobre este frágil ecosistema.

Aunque el Valle de los Frailejones se encuentra bajo un esquema de protección legal, en virtud de la Ley 1930 de 2018, que establece disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia, aún no se cuenta con una evaluación precisa de la vulnerabilidad geoespacial del área frente al turismo. La falta de infraestructura adecuada de manejo turístico, como la señalización y el cerramiento de las áreas más sensibles, ha permitido el acceso descontrolado de turistas, lo que aumenta los riesgos de degradación ambiental. Además, las actividades turísticas, como el tránsito fuera de los senderos, el uso de vehículos motorizados en áreas protegidas, y la generación de residuos, son factores que contribuyen a la alteración del ecosistema.

En este contexto, es crucial comprender el impacto que tiene el turismo en la vulnerabilidad del Valle de los Frailejones. Esta situación plantea la necesidad de evaluar, de manera integral, las áreas más afectadas y la magnitud de la amenaza que representa el incremento de la afluencia turística. Es necesario realizar un análisis geoespacial para determinar las zonas con mayor riesgo de degradación debido al turismo y, a partir de ello, desarrollar estrategias de manejo y conservación adecuadas.

La formulación de la pregunta "¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad geoespacial del Valle de los Frailejones ante el turismo?" surge de la necesidad de obtener información precisa sobre las áreas más vulnerables y sobre los factores que contribuyen a dicha vulnerabilidad, para que así se puedan tomar decisiones informadas que contribuyan a la conservación de este ecosistema vital.

1.3 Antecedentes

Los páramos son ecosistemas característicos de las montañas de la región neotropical, presentes en Costa Rica, Panamá y los Andes de Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte de Perú, y se encuentran entre los 3.200 y 3.800 metros sobre el nivel del mar (msnm). Estos ecosistemas se destacan por sus paisajes bioclimáticos desarbolados y fríos (Castañeda-Martín & Abel Efrén, 2017). Además, páramos y ecosistemas similares se distribuyen a lo largo del cinturón tropical, en los tres continentes que atraviesa la línea ecuatorial: Suramérica, África y Oceanía (Hofstede et al., 2003).

Colombia es reconocida globalmente por albergar la mayor extensión de páramos, con 48 áreas identificadas, que suman aproximadamente 1.925.410 hectáreas, de las cuales 746,644

hectáreas están dentro de los Parques Nacionales Naturales del país, lo que representa cerca del 2% del territorio nacional (Rivera Ospina & Rodríguez, 2011).

En Venezuela, se han realizado investigaciones sobre la vulnerabilidad de los frailejones en los páramos andinos, destacando la importancia de estas plantas como indicadores de la salud de los ecosistemas de páramo. Estos estudios han sido fundamentales para la creación de áreas protegidas y la implementación de estrategias de conservación (Medina et al., 2013).

En 2019, la Universidad El Bosque llevó a cabo un estudio sobre la delimitación de la zona de amortiguamiento del páramo de Murillo, en Tolima, con el fin de contribuir a la conservación del ecosistema local (Sebastián Gómez et al., 2019).

Por su parte, en 2014, el Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC) realizó un análisis sobre la factibilidad política, técnica y operativa de establecer zonas amortiguadoras para el Sistema de Parques Nacionales. Este estudio, realizado por Paredes, tiene como objetivo mejorar la gestión territorial, resolver conflictos y armonizar los instrumentos de planificación ambiental, con el fin de lograr el bienestar humano y asegurar la conservación del patrimonio natural (Paredes-Leguizamón, 2014).

En el estudio de Ramírez Gómez y Rodríguez Erazo (2024), se evaluó la vulnerabilidad del complejo de páramos Pisba, ubicado en el Departamento de Boyacá, Colombia, frente al uso del suelo. Utilizando un enfoque de análisis espacial y el método de jerarquía analítica (AHP), basado en la consulta de expertos, se calculó un índice de vulnerabilidad para el ecosistema. El análisis incluyó la identificación de 25 variables agrupadas en 11 factores que reflejan la sensibilidad, exposición y resiliencia del ecosistema. Los resultados mostraron que el 18.06 % del área presenta alta vulnerabilidad, mientras que el 59.98 % se encuentra en una situación de baja vulnerabilidad. Entre los factores más influyentes en la vulnerabilidad del páramo se destacan el estado de la vegetación, las condiciones abióticas y la conectividad. Las zonas más vulnerables fueron las coberturas de pastos y cultivos en el borde del páramo, así como los bosques andinos en las áreas de cobertura natural. Este estudio ofrece una metodología sistemática que facilita la cuantificación y caracterización de la vulnerabilidad, lo que puede ser replicado en otros complejos de páramos para su gestión y conservación.

El turismo en los páramos, ecosistemas frágiles por su naturaleza, genera impactos negativos, principalmente debido a la compactación del suelo. La alta afluencia de visitantes provoca esta compactación, lo que altera la estructura del suelo y disminuye su capacidad de infiltración de agua, afectando negativamente a la vegetación local, especialmente a los frailejones. Esta planta es esencial para el ecosistema, ya que juega un papel crucial en la retención de agua (Patrimonio Natural, 2021, p. 23). La compactación también impide el crecimiento adecuado de las raíces de los frailejones, lo que perjudica su desarrollo y su capacidad para absorber agua.

Respecto a la infraestructura turística, la construcción y el mal uso de senderos y áreas de camping puede llevar a la degradación del hábitat de especies vulnerables, como los frailejones. Estos ecosistemas son particularmente sensibles debido a su lento crecimiento y su papel fundamental en la retención de agua y la formación de suelos orgánicos. Si no se implementan medidas de manejo adecuadas, el desarrollo de miradores y zonas de camping puede causar daños irreversibles (Universidad de América, 2023, p. 45).

Otro problema importante es la acumulación de residuos sólidos, que proviene de la basura dejada por los visitantes. Según El Tiempo (2023a), los desechos sólidos representan un riesgo significativo para la flora y fauna locales, incluidos los frailejones. El manejo inadecuado de estos desechos altera las condiciones químicas del suelo, obstruye los canales de drenaje y afecta a las especies dependientes del ecosistema de páramo (p. 18).

Finalmente, el tránsito fuera de rutas establecidas también genera problemas, ya que puede causar compactación del suelo y daño directo a la vegetación, afectando la regeneración natural de especies como los frailejones. La falta de señalización adecuada y de controles efectivos permite que los visitantes exploren áreas restringidas, causando daños permanentes a la vegetación nativa y a la biodiversidad del páramo (El Tiempo, 2023b, p. 21).

2. Justificación

Los páramos son ecosistemas únicos y frágiles que albergan una biodiversidad excepcional y proporcionan servicios ecosistémicos vitales, como la regulación hídrica y la captura de carbono. En Colombia, los páramos son especialmente importantes debido a su contribución a la provisión de agua dulce para gran parte de la población y su riqueza en especies endémicas. Entre estas especies emblemáticas se encuentran los frailejones (*Espeletia* spp.), plantas adaptadas a las condiciones extremas de los páramos y consideradas indicadoras de la salud de estos ecosistemas.

Son uno de los ecosistemas más vulnerables y amenazados, su extensión se ha venido reduciendo de manera significativa en relación a otros, lo que los hace muy frágiles a los efectos globales del cambio climático y a la actividad humana (Pontificia Universidad Javeriana, 2018).

Se debe tener en cuenta que la conformación estructural de los páramos y de los ecosistemas de montaña en general, hace de ellos ecosistemas extremadamente vulnerables a los efectos antrópicos.

El sector del Valle de los frailejones en Villamaría, Caldas, alberga un importante páramo que sustenta una diversidad biológica significativa, incluyendo poblaciones de frailejones. Sin embargo, este ecosistema enfrenta múltiples amenazas, principalmente asociadas al creciente turismo, esto debido a la falta de regulación y manejo adecuado de las actividades humanas en la zona. La conservación de los páramos y sus especies, como los frailejones, ha sido un tema de interés en Colombia durante décadas. Sin embargo, la falta de información detallada sobre la vulnerabilidad de los frailejones ha obstaculizado los esfuerzos de conservación en el país. Aunque se han realizado algunos estudios sobre la distribución y la ecología de los frailejones, la mayoría de ellos carecen de un enfoque específico en la identificación de las áreas de mayor riesgo para estas plantas.

La importancia de los ecosistemas de páramo puede dividirse en tres componentes según su función. Primero, los páramos tienen un significativo valor ecológico, lo que genera un gran interés científico debido a su flora endémica y su paisaje único, lo que corresponde a su función ecológica. En segundo lugar, y estrechamente relacionado con lo anterior, los páramos son esenciales para la regulación hidrológica regional y constituyen una fuente crucial de agua potable para gran parte de la población en la zona norte de los Andes, lo que hace parte de su función hidrológica. Finalmente, los páramos cumplen una función en la producción de alimentos.

Los frailejones, especies emblemáticas de los páramos colombianos, enfrentan amenazas crecientes debido al aumento del turismo en estas áreas. A pesar de su importancia ecológica y cultural, carecemos de un mapa de vulnerabilidad que permita identificar las áreas donde los frailejones son más susceptibles a daños por el contacto directo con visitantes. Esta carencia limita nuestra capacidad para implementar medidas efectivas de conservación y manejo de estos ecosistemas frágiles

Una de las principales amenazas que afectan a los páramos a nivel mundial es el aumento de la temperatura, que obliga a las especies a migrar hacia áreas más altas y frías en busca de las condiciones óptimas para su supervivencia. Con el paso del tiempo, todo el ecosistema se desplaza hacia las zonas más altas de la montaña, provocando el desplazamiento o desaparición de los nevados y una reducción de la extensión original del páramo (Greenpeace, 2013).

La falta de un mapa de vulnerabilidad específico para los frailejones en el sector del Valle de los frailejones representa una brecha significativa en el conocimiento necesario para la conservación y gestión efectiva de este ecosistema. Por lo tanto, el desarrollo de este mapa se justifica en varios aspectos fundamentales:

- o Identificación de Áreas de Alto Riesgo: El mapa de vulnerabilidad permitirá identificar las áreas del páramo donde los frailejones son más susceptibles a sufrir daños debido al turismo. Esta información es crucial para priorizar acciones de conservación y establecer medidas de protección en las zonas más críticas.

- o Toma de Decisiones Informada: Los resultados del mapa proporcionarán una base científica sólida para informar la toma de decisiones en la gestión ambiental y el ordenamiento del territorio en el sector del Valle de los frailejones. Las autoridades locales, las organizaciones ambientales y otras partes interesadas podrán utilizar esta información para desarrollar políticas y estrategias que promuevan la conservación de los frailejones y los páramos.

- o Prevención de Impactos Ambientales: Conociendo las áreas de mayor vulnerabilidad de los frailejones, se podrán implementar medidas preventivas para mitigar los impactos negativos del turismo en el ecosistema. Esto incluye la regulación de actividades humanas, la instalación de infraestructuras adecuadas y la sensibilización de la comunidad sobre la importancia de conservar los páramos.

o Contribución al Conocimiento Científico: El desarrollo del mapa de vulnerabilidad no solo beneficiará la gestión y conservación del páramo en el sector del Valle de los frailejones, sino que también contribuirá al conocimiento científico sobre la ecología de los frailejones y la dinámica de los ecosistemas de páramo en general. Los datos recopilados y los modelos desarrollados serán útiles para investigaciones futuras y proyectos de conservación en otras regiones de páramo.

El desarrollo de un mapa de vulnerabilidad del Valle de los frailejones en Villamaría, Caldas, es fundamental para comprender y abordar las amenazas que enfrenta este importante ecosistema. Su implementación permitirá una gestión más efectiva y sostenible de los páramos, garantizando su conservación a largo plazo y la provisión continua de servicios ecosistémicos para las comunidades locales y el país en su conjunto.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad generada por el turismo en el páramo del Valle de los frailejones mediante el uso de SIG en el municipio de Villamaría, Caldas

3.2 Objetivos específicos

1. Determinar las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.
2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo.
3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo.

4. Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

Se plantea que el turismo desordenado y creciente en el páramo del Valle de los Frailejones está generando una vulnerabilidad significativa sobre los ecosistemas estratégicos presentes en la zona, especialmente sobre las poblaciones de frailejones (género *Espeletia*), afectando sus dinámicas ecológicas y su capacidad de resiliencia. Esta vulnerabilidad puede ser identificada, evaluada y representada espacialmente mediante el uso de herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), integrando variables como accesibilidad, intensidad turística, cercanía a vías, pendientes y coberturas del suelo, entre otras.

4.1.1 Hipótesis nula

No existe una relación significativa entre el desarrollo turístico en el páramo del Valle de los Frailejones y el nivel de vulnerabilidad ecológica que presentan las zonas donde se encuentran las poblaciones de frailejones. En consecuencia, el uso de herramientas SIG no proporciona evidencia suficiente para identificar o modelar espacialmente áreas en riesgo dentro del ecosistema.

4.1.1.1 Hipótesis alterna.

Existe una relación significativa entre el desarrollo del turismo y la vulnerabilidad ecológica de las zonas del páramo del Valle de los Frailejones donde se encuentra el ecosistema de frailejones, y esta relación puede ser evidenciada mediante herramientas SIG que integran variables físicas, ecológicas y antrópicas en un análisis espacial.

4.1.1.1.1 Variables.

Las variables consideradas en esta investigación se clasifican en dependientes e independientes. La variable dependiente es el nivel de vulnerabilidad ecológica del ecosistema de frailejones en el páramo. Las variables independientes incluyen: la intensidad del turismo (estimada mediante puntos de observación y flujo de visitantes), la cercanía a vías y senderos, el tipo de cobertura del suelo, la pendiente del terreno, la densidad de vegetación, y la existencia de zonas intervenidas. Estas variables fueron integradas y analizadas mediante modelos de análisis multicriterio y técnicas de geoprocesamiento en un entorno SIG.

5 Marco teórico

El marco teórico se sustenta en una serie de conceptos y teorías relacionadas con la ecología de los páramos, la conservación de la biodiversidad, y los impactos del turismo y la contaminación vehicular en los ecosistemas de alta montaña

5.1 Ecología de los paramos

5.1.1 Definición de paramo y sus características principales

Un páramo es un ecosistema exclusivo de montaña donde se desarrollan formas de vida particulares y comunidades con costumbres y características propias de estos lugares (Rodríguez, 2023). Este ecosistema se encuentra a altitudes que varían entre los 2.900 y 5.000 metros sobre el nivel del mar (msnm). El páramo andino sudamericano es el más conocido, aunque también existen páramos en África oriental, Centroamérica y Nueva Guinea. Según su función ecológica y la distribución geográfica de su flora y fauna, se clasifica en superáramos y subpáramo (Rodríguez, 2023).

Los páramos desempeñan un papel crucial debido a su altitud y clima, ya que ayudan a retener el agua y a mantener el equilibrio entre la pérdida y el aporte de agua dentro del ecosistema. Como explica Rodríguez (2023), este fenómeno permite que, durante los períodos de sequía y verano, el agua se infiltre en las tierras bajas, formando fuentes como acueductos, riachuelos, quebradas y ríos.

El concepto de "páramo" es tan complejo que resulta difícil de definir. Se considera tanto un ecosistema, un bioma, un paisaje y una zona geográfica como un espacio de producción e incluso un estado climático. Además, el valor y el significado del páramo varían considerablemente dependiendo de quién lo observe: para un campesino, el páramo puede ser simplemente un lugar donde pastan sus animales, mientras que, para un biólogo, es un espacio donde se estudian organismos y especies. Esta diversidad de interpretaciones refleja la importancia del páramo, pero también es el origen de malentendidos y, en algunos casos, de intereses encontrados (Hofstede et al., 2014).

Características principales.

Las características del páramo incluyen una gran humedad durante casi todo el año, con nubosidad abundante, lluvias constantes y un clima nublado. Esto se debe al relieve montañoso de la región, principalmente ocasionado por la cordillera de los Andes. En sus picos, es común encontrar nieve debido a la altitud (Rodríguez, 2023).

El clima en el páramo es altamente cambiante, con transiciones frecuentes entre insolación y nubosidad espesa, lo que provoca descensos de temperatura que pueden llegar a los 0 grados o incluso menos. Estas zonas se caracterizan por ser extremadamente frías, con ventiscas húmedas y presencia de aguanieve (Rodríguez, 2023).

El relieve en estas áreas es irregular, con paisajes accidentados y ásperos. Se encuentran fragmentos de grandes rocas y otras más pequeñas, que forman superficies planas y onduladas. Las pendientes de las montañas son pronunciadas y escarpadas, lo que favorece el descenso de las aguas hacia las zonas bajas (Rodríguez, 2023).

El paisaje típico del páramo está compuesto por valles amplios formados por el paso de enormes bloques de hielo, que les dan una forma en "U", creando una planicie entre dos pendientes. También existen valles en "V", generados por el paso de corrientes de agua, y se encuentran cascadas y quebradas que canalizan el agua hacia las zonas más bajas (Rodríguez, 2023).

Estas regiones son ricas en fuentes de agua, como lagos y afluentes que sirven como fuentes para los grandes ríos del norte de Sudamérica (Rodríguez, 2023).

Los suelos en los páramos son de origen volcánico. En el sur, provienen de la roca meteorizada, mientras que en el centro y norte se deben a la acumulación de ceniza volcánica. Estos suelos tienen un color oscuro debido a la gran cantidad de materia orgánica que queda atrapada y descompuesta en su interior (Rodríguez, 2023).

En cuanto a la flora y fauna, predominan las especies gramíneas, los pajonales, los bosques y los matorrales. Los animales que habitan en estos ecosistemas suelen migrar en busca de mejores

condiciones para la alimentación y reproducción. La presencia de vegetación en ciertas zonas es un indicio de la proximidad de fuentes de agua (Rodríguez, 2023).

5.1.2 Factores ambientales que influyen en la distribución y estructura de los ecosistemas de páramo (temperatura, precipitación, altitud, etc.).

Tabla 1
Factores Ambientales

Factores Ambientales	Descripción
Altitud	Los páramos se encuentran a grandes alturas, generalmente entre 3.000 y 4.000 metros sobre el nivel del mar, aunque en algunos casos pueden alcanzar hasta 4.800 metros.
Clima	El clima de los páramos es frío y húmedo, con temperaturas que rara vez superan los 20°C y que pueden bajar por debajo de 0°C durante la noche.
Precipitación	La precipitación es alta y suele manifestarse en forma de lluvias constantes, neblina o incluso granizo.
Suelos	Los suelos son ácidos y húmedos, con la presencia de turba en muchas zonas, la cual se forma por la descomposición gradual de materia orgánica en condiciones frías y húmedas.
Hidrología	Los páramos funcionan como esponjas naturales, capturando y liberando agua lentamente, lo que alimenta varias de las cuencas hidrográficas más importantes de la región andina.

Fuente: (Segui, 2023)

5.1.3 Tipos de vegetación presentes en los páramos

La vegetación del páramo desempeña un papel crucial al prevenir inundaciones durante los períodos de abundancia de agua y sequías cuando el agua es escasa, además de reducir el impacto de la erosión del suelo. Se estima que en estos ecosistemas existen más de 4.000 especies de plantas, de las cuales aproximadamente el 60% son endémicas. La flora en esta región ha evolucionado para adaptarse a las condiciones extremas que caracterizan al páramo. Entre las especies más representativas se encuentran el frailejón (*Espeletia* spp.), el cardón (*Pachycereus pringlei*), la

macolla (*Calamagrostis effusa*), los chusques (*Chusquea scandens*) y los árboles enanos y arbustos (Portillo, 2020).

5.1.4 Importancia de la dinámica del agua en los páramos

El páramo desempeña un papel crucial como regulador hídrico, ya que sustenta el flujo base de las corrientes que nacen en estos ecosistemas y descienden hacia las zonas medias y bajas. Además, contribuye a la alta calidad del agua gracias a su notable capacidad de almacenamiento de agua, relacionada con su potencial de infiltración, los complejos humedales, la morfología de las cuencas, los tipos de suelos, la formación de niebla y la capacidad de retención de las plantas presentes en el ecosistema (Rivera Ospina & Rodríguez, 2011).

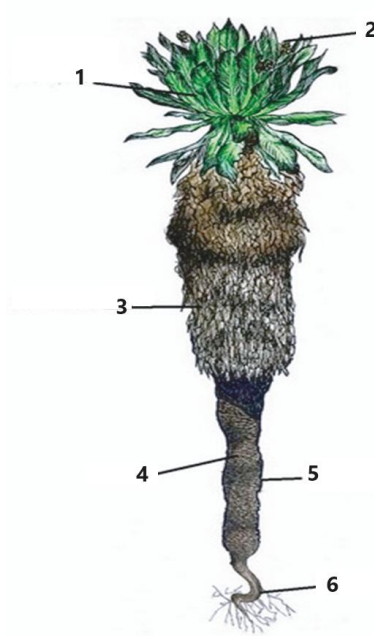
5.2 Importancia de los Frailejones

5.2.1 Descripción morfológica y fisiológica de los frailejones (*Espeletia spp.*)

El frailejón es una especie perteneciente al género *Espeletia* y se encuentra registrada en los páramos ecuatorianos y colombianos. Estas plantas están compuestas por 7,5 % de necromasa (hojas y estructuras muertas de reproducción). Únicamente el 26 % de la planta está compuesta por biomasa, entre raíces y ramas. Por lo general, estas plantas producen hojas durante todo el año, dispuestas verticalmente, para una mejor fotosíntesis. En la figura 1 se ilustra la morfología de esta especie de frailejón, en la que se muestra una capa de hojas muertas, característica común de esta especie, que se forma de manera gradual y es indispensable para su supervivencia. Esta planta se caracteriza por poseer una Roseta Caulescente (forma de crecimiento del frailejón), con una altura máxima de 3 m y capitulescencias de flores amarillas

Figura 1

Morfología del frailejón Espeletia pycnophylla. 1) Hojas siempre verdes, 2) Fluorescencias, 3) Capa de hojas muertas, 4) Tallo, 5) Médula y 6) Raíz



Fuente:(Tipaz Cuaical & Cardona Palacio, 2023)

Figura 2

Morfología en ambiente natural



Fuente: Propia

5.2.2 Funciones ecológicas de los frailejones en los ecosistemas de páramo

Los frailejones desempeñan un papel fundamental en la conservación del ecosistema de páramo y en la provisión de servicios ecosistémicos. Estos vegetales contribuyen significativamente a la regulación del agua al acumularla en sus tejidos, lo que ayuda a prevenir la erosión del suelo y favorece la producción de biomasa y necromasa. Esta última funciona como una especie de esponja que retiene agua, crucial para el equilibrio del ecosistema (Pontificia Universidad Javeriana, 2018).

La conservación de los páramos es vital para la protección de las fuentes de agua dulce, esenciales para las comunidades humanas. En este contexto, los frailejones no solo son plantas emblemáticas, sino que también se consideran elementos imprescindibles para mantener la integridad de los páramos y garantizar su conservación a largo plazo (Pontificia Universidad Javeriana, 2018).

5.2.3 Interacciones planta-planta y planta-animal que involucran a los frailejones.

Se han documentado numerosas interacciones entre plantas, animales y hongos, con más de 150 especies registradas que interactúan con los frailejones, incluyendo grupos como artrópodos, moluscos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos (Díazgranados, 2015; García et al., 2005).

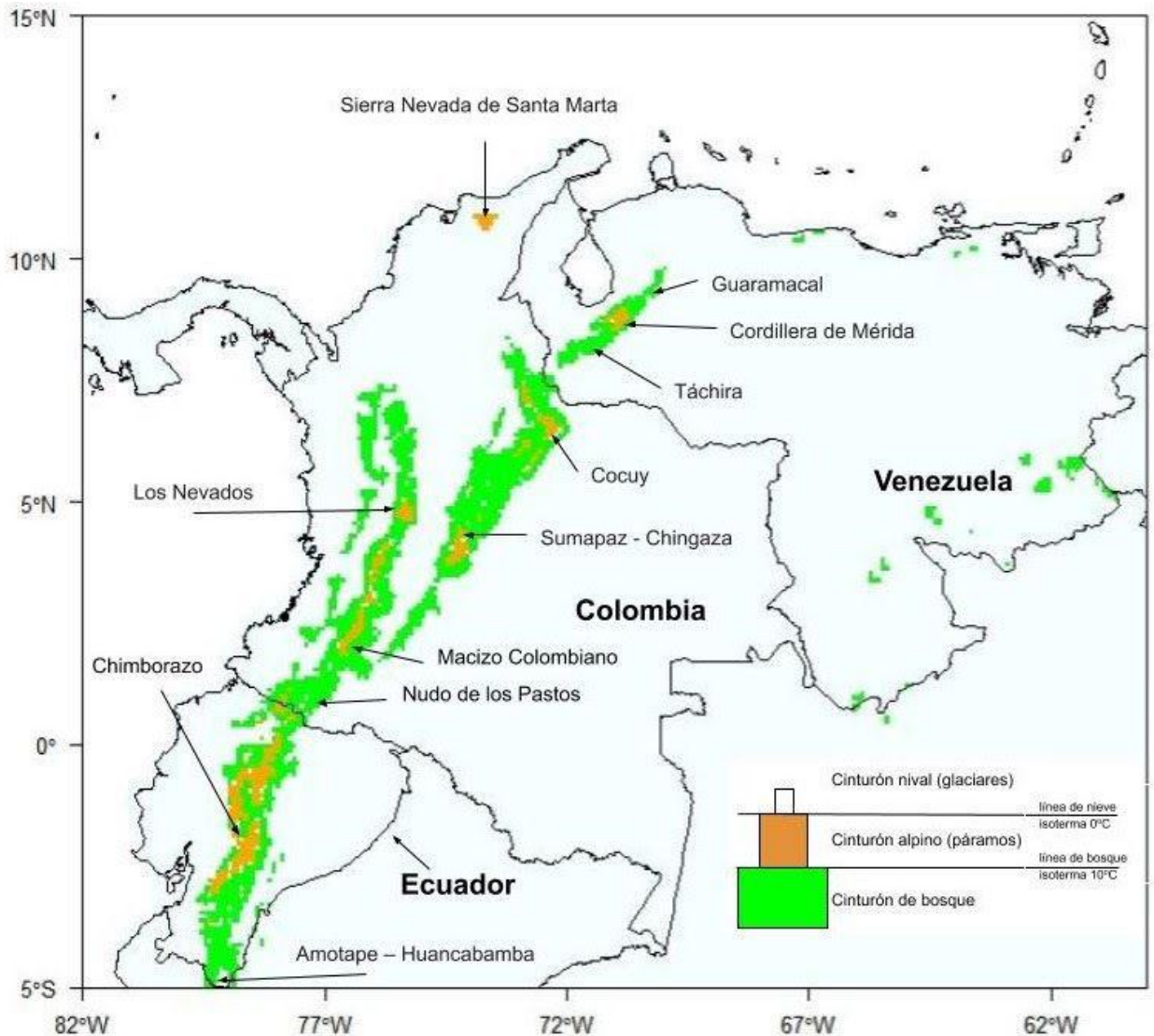
Las partículas de polen de los frailejones contienen espinas que les permiten adherirse a ciertos insectos, como abejas y abejorros (*Bombus*, *Colletes*, *Apis*), avispa y moscas (*Syrphidae* y *Tachinidae*), así como a cucarrones (*Curculionidae* y *Elateridae*) y luciérnagas (*Lampyridae*), e incluso a algunas aves como colibríes. Estos polinizadores generalmente no son capaces de atravesar los valles entre los páramos, por lo que suelen estar aislados en las zonas de interacción (Díazgranados, 2015).

5.2.4 Distribución geográfica de los frailejones y su variabilidad genética.

A los ecosistemas tropicales alpinos ubicados en los Andes del Norte se les denominan páramos y están distribuidos entre los 3.200 y 4.100 msnm (Figura 3)

Figura 3

Distribución de cinturón de ecosistemas alpinos (páramos) en Ecuador, Colombia y Venezuela. Estos fueron estimados usando la definición de zonas climáticas Köppen-Geiger



Fuente: (Burbano-Figueroa et al., n.d.; Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017)

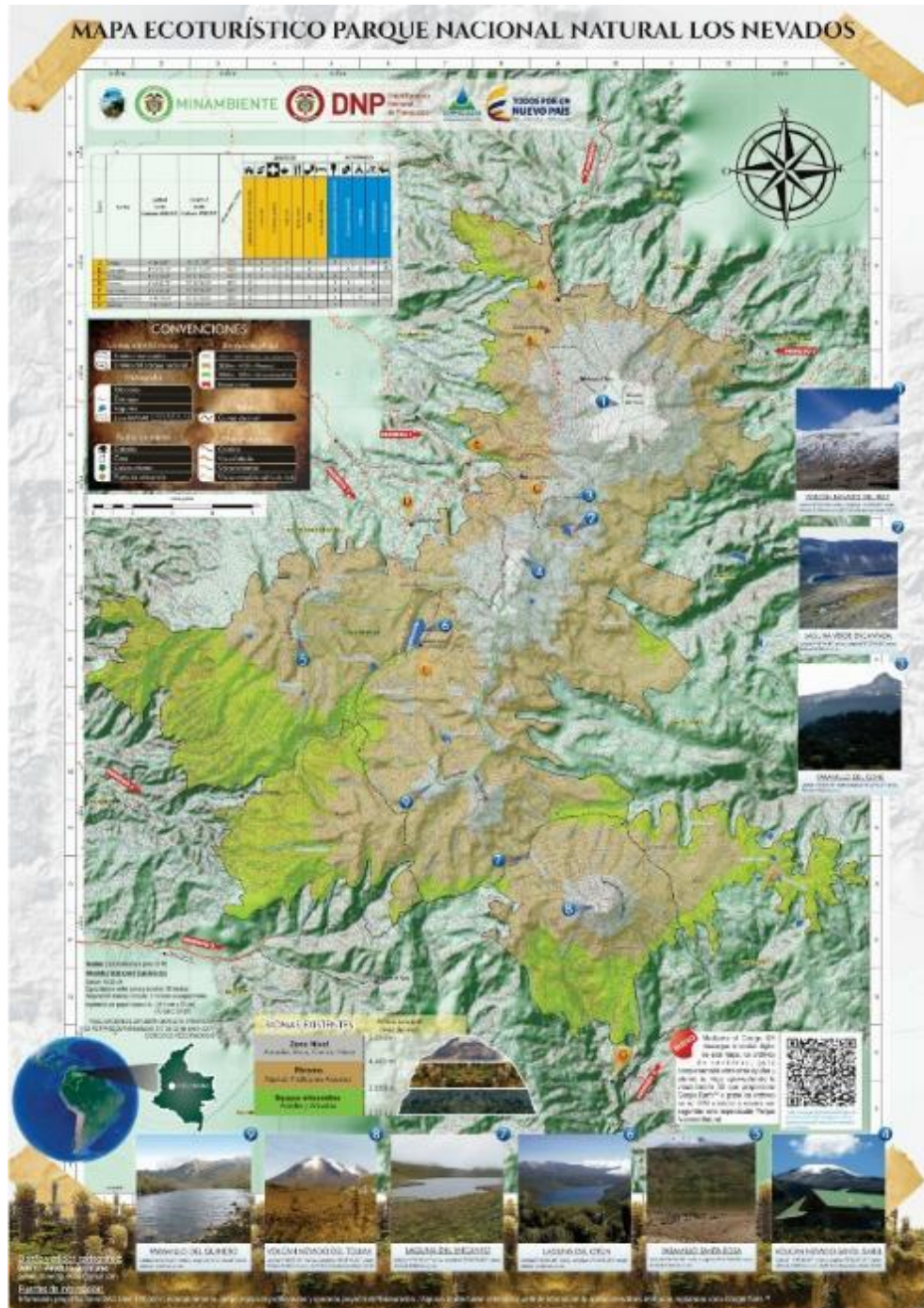
5.3 Impactos del Turismo

5.3.1 Tipos de actividades turísticas comunes en los páramos.

Como parte de algunas estrategias de conservación se está promoviendo el turismo ecológico, para proteger la diversidad biológica del planeta en muchas regiones del mundo, además

puede llegar a ser una valiosa fuente de ingresos para diversas regiones y países. (Morales y Estévez, 2006)

Figura 4
Mapa ecoturístico PNNN



Fuente: (La Patria, 2021)

Algunas de las actividades turísticas que se hacen en este ecosistema son las siguientes:

Senderismo y Caminatas: El senderismo es una la actividad más popular en los páramos, ya que permite a los visitantes explorar los paisajes naturales y disfrutar de las vistas panorámicas. Los senderos bien marcados suelen llevar a puntos de interés como lagunas, miradores y cascadas.

Observación de Aves: Los páramos son hábitats importantes para una variedad de aves endémicas y migratorias. La observación de aves atrae a muchos turistas de diferentes partes del mundo interesados en avistar especies únicas y coloridas como colibríes, tangaras y pinzones.

Turismo Fotográfico: La belleza escénica y la biodiversidad de los páramos hacen que sean destinos idóneos para los aficionados a la fotografía. Los turistas disfrutan capturando imágenes de paisajes montañosos, flores silvestres, lagunas cristalinas y especies de fauna únicas.

Actividades de Educación Ambiental: Algunos turistas buscan experiencias educativas en los páramos, participando en actividades guiadas por expertos locales que ofrecen información sobre la ecología, la flora y la fauna de estos ecosistemas. Estas actividades suelen incluir charlas, caminatas interpretativas y talleres prácticos realizados por la comunidad o los entes reguladores de la región.

Observación de Flora y Fauna: Muchos visitantes ven atraídos por la oportunidad de observar la diversidad de plantas y animales que habitan en los páramos. Los frailejones, musgos, líquenes, anfibios y mamíferos como el oso de anteojos son algunas de las especies emblemáticas que los visitantes desean encontrar en sus visitas.

5.3.2 Efectos del turismo en la biodiversidad y el ecosistema

El turismo en áreas protegidas ha incrementado en los últimos años, pero en muchos casos, este crecimiento no ha sido acompañado de la concienciación adecuada. Según un informe de La Patria (2021), la inconsciencia es lo que está caracterizando a algunos visitantes de la zona de páramo y del Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN) que están realizando prácticas irresponsables, como arrojar basuras, usar pólvora, practicar motocross, llevar parlantes para poner

música a alto volumen e ingresar por rutas prohibidas con operadores turísticos no autorizados. Estas actividades, realizadas sin control ni regulación, tienen efectos negativos en el ecosistema, exacerbando los impactos sobre la biodiversidad y el ambiente. A continuación, se presentan los impactos más destacados del turismo en la biodiversidad y el ecosistema.

El turismo genera diferentes tipos de impactos sobre el medio ambiente, tanto positivos como negativos. Esta tabla presenta un resumen de los principales efectos del turismo sobre los ecosistemas. Se consideran tanto los impactos positivos como negativos y algunas estrategias que se deben implementar para evitar el deterioro del medio ambiente.

Tabla 2

Impactos del turismo en el medio ambiente

Impactos	Descripción
Concienciación y sensibilización sobre las opciones de turismo sostenible	Organizaciones como el Fondo Mundial para la Naturaleza y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente han diseñado programas y estrategias que promueven el turismo sostenible.
Adopción e implementación de medidas regulatorias	Implementar regulaciones como limitar la cantidad de visitantes y establecer normativas restrictivas contribuye a la protección de los recursos naturales y los ecosistemas.
Desarrollo de infraestructura	Mejorar la infraestructura turística puede beneficiar tanto a las comunidades locales como al paisaje, favoreciendo la integración de las zonas turísticas.
Preservación de monumentos históricos y patrimonio cultural	El turismo puede fomentar la conservación del patrimonio cultural y los monumentos históricos, al aumentar la conciencia pública y la demanda para su preservación.
Degradación y pérdida de ecosistemas naturales y paisajes estéticos	El turismo no regulado puede causar daños a los ecosistemas naturales, llevando a la pérdida de paisajes naturales que son vitales para el medio ambiente.
Contaminación ambiental	El turismo puede generar diversos tipos de contaminación, tales como la contaminación del aire, agua, suelo y el ruido, afectando negativamente al medio ambiente.
Agotamiento de los recursos naturales y presión sobre los existentes localmente	El aumento del turismo ejerce presión sobre los recursos naturales locales, como el agua y

	los alimentos, provocando su agotamiento y afectando a las comunidades locales.
Erosión de las normas sociales y culturales destinadas a preservar los patrimonios locales y ambientales	Las actividades turísticas pueden socavar las normas culturales locales y poner en peligro la conservación del patrimonio cultural y ambiental de las comunidades.
Contribuyente al calentamiento global y el cambio climático	El turismo es un factor importante en la emisión de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al calentamiento global y al cambio climático.

Fuente: (Admin, 2024)

Como se puede observar en la tabla 2, el turismo puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales. Es importante implementar medidas como la concienciación sobre el turismo sostenible y la adopción de regulaciones que limiten la cantidad de visitantes. Sin embargo, los impactos negativos, como la contaminación, la degradación de los ecosistemas naturales y el agotamiento de los recursos, requieren atención inmediata para evitar daños irreparables.

5.3.3 Factores de impacto ambiental en áreas turísticas

La degradación ambiental es el proceso mediante el cual el medio ambiente sufre un deterioro debido al agotamiento de los recursos naturales causados por su sobreexplotación. Esto da lugar a la destrucción de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad.

Impactos en el medio biótico

Los ecosistemas son vulnerables a una variedad de factores ambientales, muchos de los cuales son intensificados por la actividad humana. En esta tabla se presenta un resumen de los impactos más significativos sobre los componentes vivos del ecosistema, incluyendo la biodiversidad y los recursos naturales. Los impactos señalados en la tabla están directamente relacionados con las prácticas turísticas, la sobreexplotación y la alteración de los espacios naturales

Tabla 3

Impactos ambientales medio biótico

Factor ambiental	Impacto ambiental
-------------------------	--------------------------

Ecosistemas	Perdida de conservación estratégica de los ecosistemas
Espacios naturales	Desaparición o deterioro de los espacios naturales
Diversidad	Alteración, reducción y sustitución de especies
Recursos naturales	Explotación excesiva y agotamiento de los recursos naturales
Coberturas vegetales	Reducción o pérdida de la vegetación
Población	Modificación de los procesos naturales de los ecosistemas

Fuente: (Ruiz González, 2020.)

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 3, los impactos sobre el medio biótico evidencian la urgente necesidad de implementar estrategias de conservación. La alteración de las especies, la reducción de la cobertura vegetal y el agotamiento de los recursos naturales son efectos directos de la intervención humana en áreas protegidas. Es crucial adoptar medidas efectivas para evitar la modificación de las dinámicas naturales de los ecosistemas y fomentar la restauración ecológica en las zonas más vulnerables.

Impactos en el medio físico

El impacto de las actividades humanas sobre el medio físico es igualmente significativo, abarcando áreas como la calidad del aire, la estructura del paisaje y el uso del suelo. Esta tabla presenta algunos factores ambientales y los impactos asociados más comunes en el medio físico.

Tabla 4

Impactos ambientales medio físico

Factor ambiental	Impacto ambiental
Calidad físico química y/o bacteriológica	Contaminación del agua
Calidad del aire	Aumento del material particulado, concentración de dióxido de carbono y olores desagradables
Uso del suelo	Modificación del uso del suelo
Estructura	Alteración estética del paisaje
Morfo-estructuras	Inestabilidad de los taludes
Fertilidad	Deterioro de la calidad del suelo, erosión y compactación
Ruido	Aumento de la contaminación acústica
Caudales	Reducción de los caudales de agua

Fuente: (Ruiz González, 2020.)

La tabla 4 muestra los efectos sobre el medio físico; estos incluyen la contaminación del aire y del agua, el cambio en el uso del suelo y la desestabilización de taludes, entre otros. Estos impactos son generados por la falta de un manejo adecuado del turismo y la sobreexplotación de los recursos naturales. La erosión del suelo y el aumento del material particulado afectan tanto la calidad de vida de las especies locales como la de las comunidades humanas cercanas.

Impactos en el medio socio-económico-cultural

El turismo no solo afecta el medio ambiente natural y físico, sino que también tiene implicaciones significativas sobre el contexto socioeconómico y cultural de las comunidades locales. Esta tabla detalla algunos de los impactos tanto positivos como negativos que se consideran más destacados que las actividades turísticas pueden tener sobre el bienestar social, la cultura local y la economía en áreas turísticas

Tabla 5

Impactos ambientales en el medio socio-económico-cultural

Factor ambiental	Impacto ambiental
Empleo	Aumento de las oportunidades laborales
Bienestar social	Reducción de la pobreza; Creación de proyectos de conservación financiados por el turismo; Ampliación de las oportunidades culturales y recreativas
Valores y prácticas culturales	Fortalecimiento de los valores y la identidad cultural
Valores ciudadanos	Concientización de los turistas y de la comunidad local
Morfo-estructuras	Inestabilidad de los taludes
Calidad del aire	Aumento de la concentración de dióxido de carbono
Empleo	Cambio en la actividad económica; Fomento de actividades ilegales
Cultura	Pérdida de valores y tradiciones culturales; Despersonalización del destino turístico
Población	Crecimiento de la población flotante
Estructura de la propiedad	Aumento de la concentración y el precio de la tierra
Mercados y comercio	Pérdida de inversiones locales; Aumento de la importación de productos y servicios

Servicios públicos	Mayor demanda de agua potable; Mayor necesidad de energía eléctrica; Incremento de residuos sólidos
--------------------	---

Fuente: (Ruiz, González, 2020.)

En la tabla 5 se muestra que, si bien el turismo puede traer beneficios como la creación de empleo y el incremento del bienestar social, también genera efectos negativos considerables, como la alteración de las dinámicas culturales locales y el aumento de la presión sobre los recursos locales. Los impactos socioeconómicos, tales como el encarecimiento de la tierra y la fuga de inversiones locales, pueden deteriorar las comunidades que dependen de sus recursos naturales.

5.4 Conservación y Manejo de Páramos

5.4.1 La provisión de servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos se refieren a las contribuciones directas e indirectas de los ecosistemas al bienestar humano (De Groot, 2013). Los páramos, ecosistemas vitales y únicos, proporcionan una amplia gama de servicios que benefician tanto a las comunidades humanas como al equilibrio ambiental. Estos servicios se clasifican en tres categorías principales:

Servicios de abastecimiento: Incluyen recursos tangibles como agua dulce, alimentos, madera y fibras, que son fundamentales para la subsistencia y el desarrollo económico de las poblaciones locales.

Servicios de regulación: Comprenden procesos naturales que modulan el clima, purifican el agua, previenen la erosión del suelo y facilitan la polinización, todos los cuales son esenciales para mantener un entorno saludable.

Servicios culturales: Ofrecen beneficios intangibles como recreación, educación, identidad cultural y bienestar espiritual, que refuerzan la conexión entre las comunidades y su entorno natural. A continuación, se presenta la tabla detallada que muestra los servicios específicos de cada categoría.

Tabla 6*Servicios Ecosistémicos*

Servicios culturales	Servicios de regulación	Servicios de abastecimiento
Ecoturismo	Control biológico	Plantas para combustible y energía
Conocimiento científico	Polinización	Recursos medicinales
Educación ambiental	Regulación hídrica	Medio de comunicación y transporte
Turismo	Regulación micro climática	Pesca
Valor de la existencia	Fertilidad del suelo	Alimento por agricultura
Valores sagrados	Control de la erosión	Alimento por ganadería
Valores espirituales	Depuración del agua	Provisión de agua
Valores estéticos	Purificación del aire	Recursos ornamentales
Conocimiento ecológico local	Amortiguación de perturbaciones	X
Identidad cultural y sentido de pertenencia	Hábitat de especies	X
Actividades recreativas	X	X

Fuente: (Nieto et al., 2015.)

en la Tabla 6 se refleja la diversidad y la riqueza de los servicios ecosistémicos que los páramos, ofrecen a las comunidades humanas y al medio ambiente.

5.4.2 Identificar estrategias de conservación

Las estrategias de conservación implementadas en áreas protegidas de páramo están orientadas a preservar la biodiversidad, proteger los ecosistemas frágiles y asegurar el uso sostenible de los recursos naturales. Entre las estrategias de conservación propuestas se incluyen las siguientes:

Zonificación: Consiste en dividir las áreas protegidas en distintas zonas, cada una con niveles específicos de restricciones y usos permitidos, con el fin de equilibrar la conservación con las necesidades humanas. Por ejemplo, se pueden definir zonas de uso público, de conservación estricta y de restauración. El manejo participativo de los páramos debe comenzar con procesos de zonificación y la definición de los regímenes de uso, en los cuales deben participar los actores locales a través de encuentros, reuniones y talleres organizados por los proyectos en las áreas de páramo y procesos de socialización (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2023).

Monitoreo y vigilancia: Es necesario implementar programas de monitoreo para evaluar el estado de los ecosistemas de páramo y detectar amenazas potenciales, como la deforestación, la

minería ilegal o la caza furtiva. Esto puede incluir el uso de tecnologías de monitoreo remoto, patrullajes terrestres y la participación comunitaria en las tareas de vigilancia. Según el Ministerio del Ambiente del Ecuador (2023), también se debe promover el monitoreo participativo, donde las comunidades locales involucradas en los proyectos participen activamente en la supervisión de los mismos, lo que permite una mayor implicación y genera buena gobernabilidad al reducir conflictos.

Educación ambiental y sensibilización: Es fundamental desarrollar programas educativos ambientales dirigidos a la comunidad local, visitantes y otros actores relevantes, con el objetivo de aumentar la conciencia sobre la importancia de los ecosistemas de páramo y promover prácticas de uso sostenible de los recursos naturales. Ante los desafíos de los páramos, es esencial fortalecer y ampliar los esfuerzos de educación ambiental como estrategia clave para su conservación, restauración, la preservación de saberes ancestrales, la adaptación al cambio climático y el fomento de alternativas de producción sostenible (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2023).

Investigación científica: La investigación científica es crucial para proporcionar datos y análisis que ayuden a comprender mejor los ecosistemas de páramo, identificar amenazas y desarrollar estrategias de conservación basadas en evidencia. Esta estrategia es clave para tomar decisiones informadas y aplicar prácticas de manejo adaptativo. Es importante valorar el estado del conocimiento sobre estos ecosistemas, identificar las prioridades de investigación y diseñar acciones de adaptación para mejorar la resiliencia de los páramos (Vergara, Paulina A, 2020).

Participación comunitaria: La participación de las comunidades locales en procesos de conservación es fundamental, ya que aportan valiosos saberes locales sobre la biodiversidad de la fauna y flora, así como sobre las condiciones biofísicas del territorio. Estas comunidades exploran una relación de armonía y equilibrio con su entorno, facilitando modelos para el uso y manejo del territorio de páramo. Además, los conocimientos locales implican derechos y responsabilidades, lo que fortalece la protección de las áreas de conservación (Fraile, R. Germán L., 2017).

6. Metodología

La metodología de trabajo propuesta se basa en una serie de pasos estructurados y secuenciales que permiten abordar de manera integral cada uno de los objetivos específicos del proyecto. Cada fase y actividad ha sido diseñada para responder a las necesidades de investigación planteadas, garantizando la obtención de datos precisos y la generación de resultados confiables.

El turismo en ecosistemas sensibles, como los páramos donde habitan los frailejones, genera un impacto significativo en la integridad de estos hábitats. Factores como la compactación del suelo, la generación de residuos, la alteración del hábitat y el tránsito por áreas vulnerables pueden degradar el entorno, afectando la regeneración y la supervivencia de los frailejones. Para evaluar esta vulnerabilidad, se hace necesario integrar múltiples variables geoespaciales en un modelo de vulnerabilidad que identifique las áreas más afectadas y priorice acciones de manejo.

6.1 Enfoque metodológico

Investigación Mixta

La investigación mixta se justifica debido a la complejidad del problema y la necesidad de abordarlo desde diferentes perspectivas. La investigación cualitativa se usará con el fin de comprender e identificar cuáles son los principales impactos ambientales relacionados al turismo. Por otro lado, la investigación cuantitativa permitirá recopilar datos numéricos sobre la distribución de frailejones, la intensidad del, los cuales pueden ser analizados estadísticamente para obtener conclusiones claras y dar resolución óptima a los objetivos propuestos.

6.2 Tipo de estudio

En este caso se utilizará un tipo de estudio descriptivo ya que, se busca identificar los principales impactos relacionados al turismo en el área de estudio, así como identificar las zonas más vulnerables asociadas al turismo. Este enfoque permite obtener una comprensión detallada de la situación actual y proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la gestión y conservación de los páramos colombianos.

6.3 Procedimiento

Para obtener los resultados esperados, el procedimiento se establece acorde con el cumplimiento de los objetivos específicos.

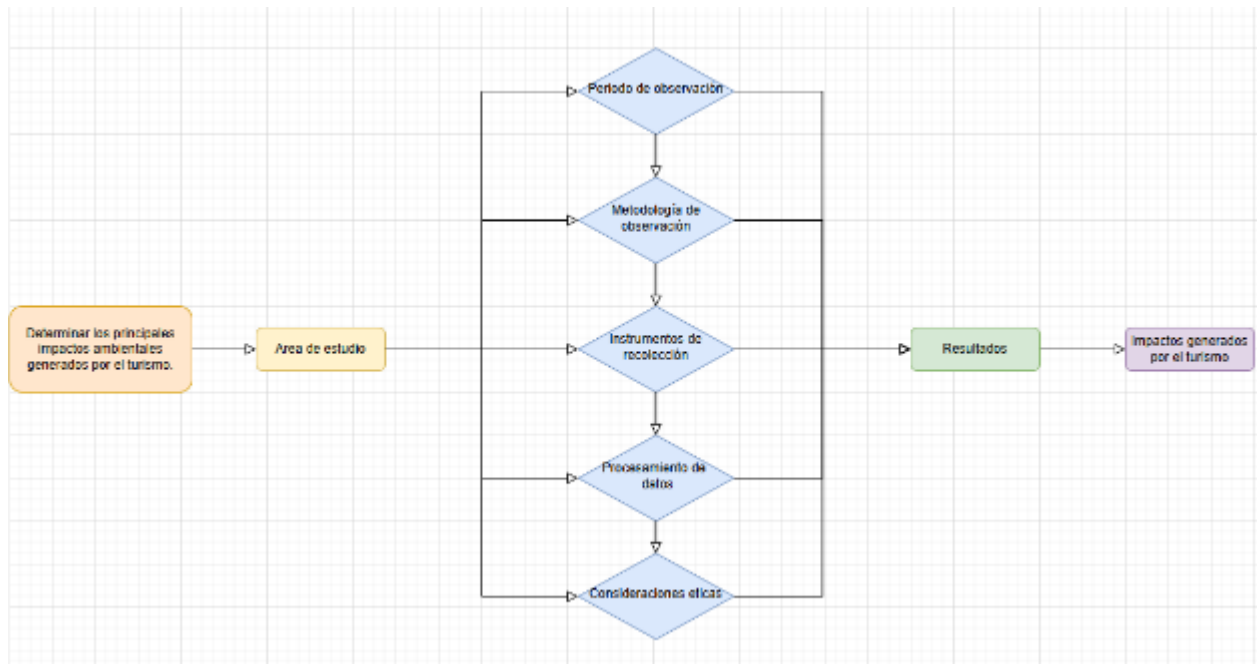
- Determinar las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.
- Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo.
- Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo

6.3.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.

Este diagrama (Figura 5.) ilustra las fases clave del proceso investigativo del objetivo 1, comenzando con la identificación del área de estudio y seguido por la definición del periodo de observación, la metodología de observación, y los instrumentos de recolección de datos. Posteriormente, se realiza el procesamiento de los datos obtenidos y, finalmente, se analizan los resultados para identificar los impactos generados por las actividades turísticas.

Figura 5

Diagrama de flujo objetivo específico 1



Fuente: Propia (DrawIO)

Para alcanzar este objetivo, se empleó una metodología de observación sistemática que permitió registrar, de manera detallada, las actividades realizadas por los turistas y evaluar sus efectos sobre el ecosistema. Este enfoque, centrado en la observación directa, permitió obtener datos cualitativos y cuantitativos que contribuyen a una mejor comprensión de los impactos ambientales derivados del turismo en el Valle de los Frailejones.

Área de Estudio

La investigación se llevó a cabo en el Valle de los Frailejones, un ecosistema de páramo cercano al Parque Nacional Natural Los Nevados, en el municipio de Villamaría, Caldas. Esta área se destaca por su importancia ecológica, ya que alberga diversas especies endémicas, como el frailejón (*Espeletia* sp.), que juega un papel fundamental en la regulación hídrica del ecosistema y cuya preservación es crucial para la sostenibilidad del páramo. Debido a la fragilidad de este

ecosistema, cualquier alteración, por mínima que sea, puede tener efectos devastadores a largo plazo.

La zona de estudio se seleccionó con el objetivo de comprender los impactos de las actividades turísticas sobre estos ecosistemas frágiles, focalizándose en las zonas con mayor afluencia de visitantes. Se observó cómo las actividades realizadas en estas áreas impactan directamente la vegetación, el suelo y la fauna.

Periodo de Observación

El período de observación abarcó los meses de agosto, septiembre y octubre de 2024, durante los cuales se realizaron salidas de campo de manera semanal, los fines de semana, para asegurar una cobertura temporal adecuada de las actividades turísticas. Estas salidas se llevaron a cabo en un horario comprendido entre las 7:00 a.m. y las 3:00 p.m., dependiendo de las condiciones climáticas y logísticas del día. El trabajo de campo se concentró en los días de mayor afluencia de turistas, lo que permitió obtener datos representativos de las actividades realizadas en el Valle de los Frailejones.

Tabla 7
Días de visita

Mes	Días de Visita
Agosto	3 y 4, 10 y 11, 17 y 18, 24 y 25, 31
Septiembre	1, 7 y 8, 14 y 15, 21 y 22, 28 y 29
Octubre	5 y 6, 12 y 13, 19 y 20, 26 y 27

La tabla 7 presenta un resumen de los días específicos en los que se llevaron a cabo las observaciones en campo durante el período de estudio en el Valle de los Frailejones. Estos días corresponden a los fines de semana de los meses de agosto, septiembre y octubre de 2024, cuando se registraron las actividades realizadas por los turistas. La selección de estos días estuvo basada en la frecuencia de visitas observada durante estos períodos, lo que permitió captar una muestra

representativa de los comportamientos turísticos en el área. La tabla está organizada por mes, facilitando la comprensión de la distribución temporal de las salidas de campo y su correlación con los patrones de afluencia de turistas en la zona.

Metodología de Observación y Registro

Para la recolección de información, se utilizó una técnica de observación directa no participativa, en la cual se documentaron las actividades realizadas por los turistas sin intervenir en su comportamiento. Este enfoque garantizó que las observaciones fueran lo más objetivas posibles, sin influir en las acciones de los visitantes. Los puntos de observación se seleccionaron estratégicamente en diversas áreas del Valle de los Frailejones, en aquellos lugares donde se observó un mayor número de turistas y donde las actividades podían tener un impacto considerable sobre el ecosistema.

El registro de las actividades turísticas fue realizado de manera detallada, tanto por escrito como mediante fotografía, lo que permitió documentar los efectos visibles de las actividades realizadas por los turistas, como caminatas, ingreso a zonas restringidas, generación de residuos y perturbación de la flora y fauna local. Esta metodología permitió obtener un panorama completo de las conductas que podrían estar contribuyendo al deterioro del entorno natural.

Instrumentos de Recolección de Datos

Para garantizar la precisión en el registro de las actividades, se utilizaron diversos instrumentos y herramientas, los cuales fueron seleccionados específicamente para facilitar la recolección de datos en un entorno natural tan particular como el páramo. Estos instrumentos incluyen:

Cuaderno de campo: Utilizado para hacer anotaciones detalladas de las actividades observadas y cualquier evento relevante que se presentara durante las jornadas de campo.

Cámara fotográfica: Utilizada para documentar evidencias visuales de las actividades turísticas y sus posibles efectos negativos sobre el entorno, lo que contribuyó a proporcionar pruebas visuales que complementan los datos escritos.

GPS: Para georreferenciar las áreas de mayor impacto, se emplearon dispositivos GPS que permitieron obtener coordenadas precisas de las zonas afectadas, facilitando la localización exacta de los lugares con mayor perturbación ambiental.

Procesamiento y Análisis de Datos

Una vez recopilados los datos, se procedió a su sistematización en matrices de observación, que permitieron clasificar las actividades realizadas por los turistas en función de su potencial impacto ambiental. Este análisis incluyó la identificación de las conductas de los visitantes que generaban mayores alteraciones al ecosistema, con especial énfasis en los frailejones, el suelo y la fauna. El procesamiento de los datos se realizó utilizando herramientas especializadas, que permitieron organizar la información de forma clara y estructurada.

Consideraciones Éticas y Ambientales

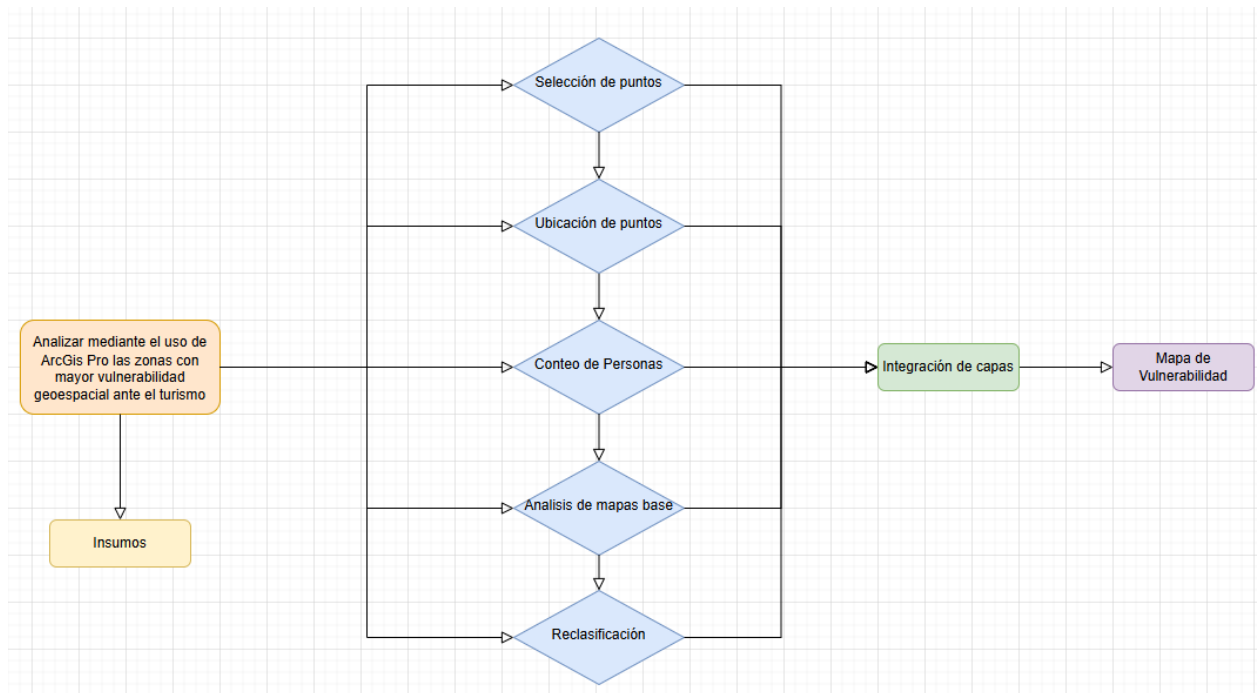
Durante el desarrollo del estudio, se respetaron estrictamente las normativas ambientales vigentes en la zona protegida, garantizando que la investigación no interfiriera con las actividades de los turistas ni causara ningún daño al ecosistema de páramo. Además, se tomaron medidas para minimizar el impacto personal durante las observaciones, siguiendo estrictos protocolos de bajo impacto, lo que aseguró que la investigación no afectara negativamente el equilibrio natural del lugar.

Asimismo, se adoptó un enfoque ético en cuanto al trato con los turistas, sin solicitárseles información personal y sin intervenir en sus actividades. De esta manera, se garantizó que las observaciones fueran lo más imparciales posibles, contribuyendo a la objetividad del estudio.

6.3.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo.

El diagrama de flujo (Figura 6.) corresponde al Objetivo Específico 2, que tiene como propósito analizar, mediante el uso de ArcGIS Pro, las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo en el Valle de los Frailejones. Este proceso empieza con la selección y ubicación de los puntos clave de estudio, seguido por el conteo de personas en dichos puntos, lo cual es esencial para determinar la presión turística en cada área. Posteriormente, se realiza un análisis de mapas base, seguido de una reclasificación de los datos, y se integra toda la información recopilada en una capa geoespacial para finalmente obtener un mapa de vulnerabilidad.

Figura 6
Diagrama de flujo objetivo específico 2



Fuente: Propia (DrawIO)

A continuación, se describen los insumos empleados para generar el mapa de vulnerabilidad geoespacial.

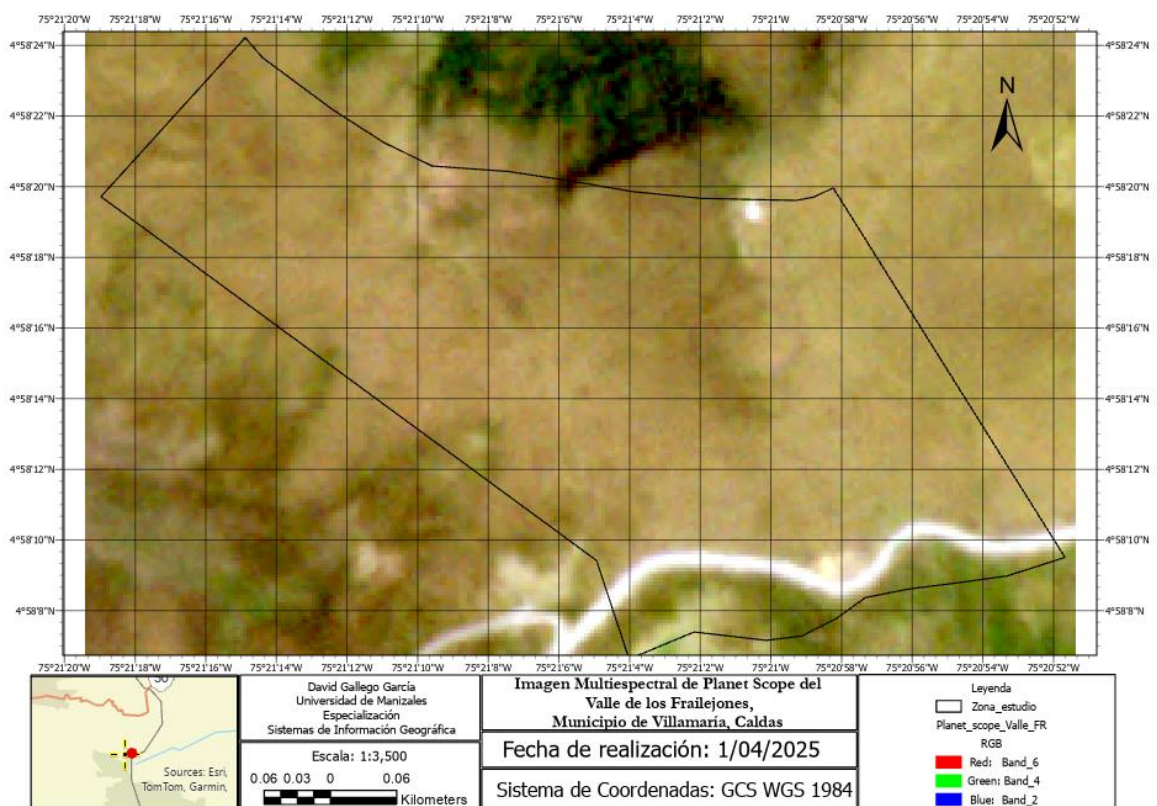
Para la construcción del mapa de zonas de vulnerabilidad geoespacial, se emplearon diversos insumos y herramientas que permitieron la representación precisa de los diferentes

factores de riesgo asociados a la presencia de turistas en la zona. A continuación, se detallan los principales insumos utilizados en la elaboración de este mapa.

Imagen Multiespectral Planet Scope

Se utiliza una imagen multiespectral de la zona de estudio, del portal de imágenes satelitales Planet Scope; este portal cuenta con una resolución espacial de 3m por pixel, lo que facilitara la identificación del índice NDVI

Figura 7
Imagen Planet Scope



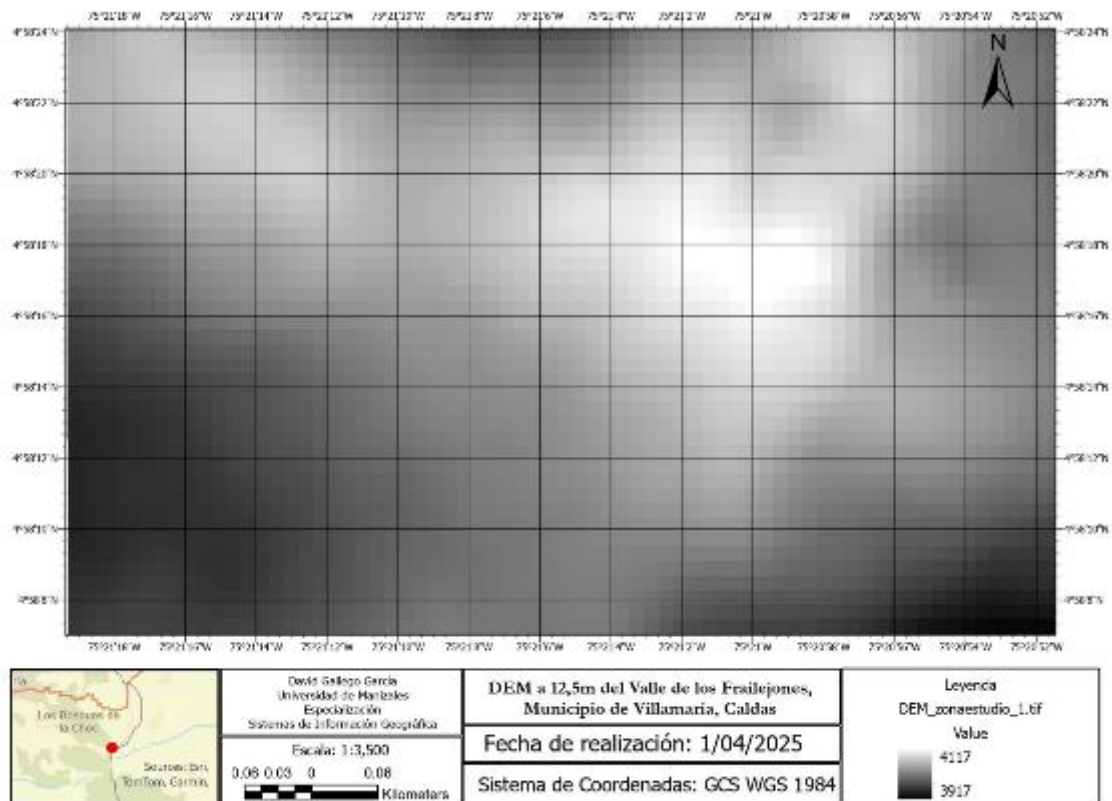
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Modelo Digital de Elevación (DEM)

Se utiliza un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución inicial de 12,5 metros, proveniente del programa Copernicus, que proporciona información topográfica detallada y

precisa. Este DEM es fundamental para la representación tridimensional del relieve del terreno, lo que permite identificar áreas de alto riesgo debido a la pendiente del terreno o a la cercanía con cuerpos de agua. Con el fin de mejorar la resolución y aumentar la precisión en el análisis, el DEM fue procesado y ajustado para obtener una resolución de 10 metros.

Figura 8
DEM 10m Zona de estudio



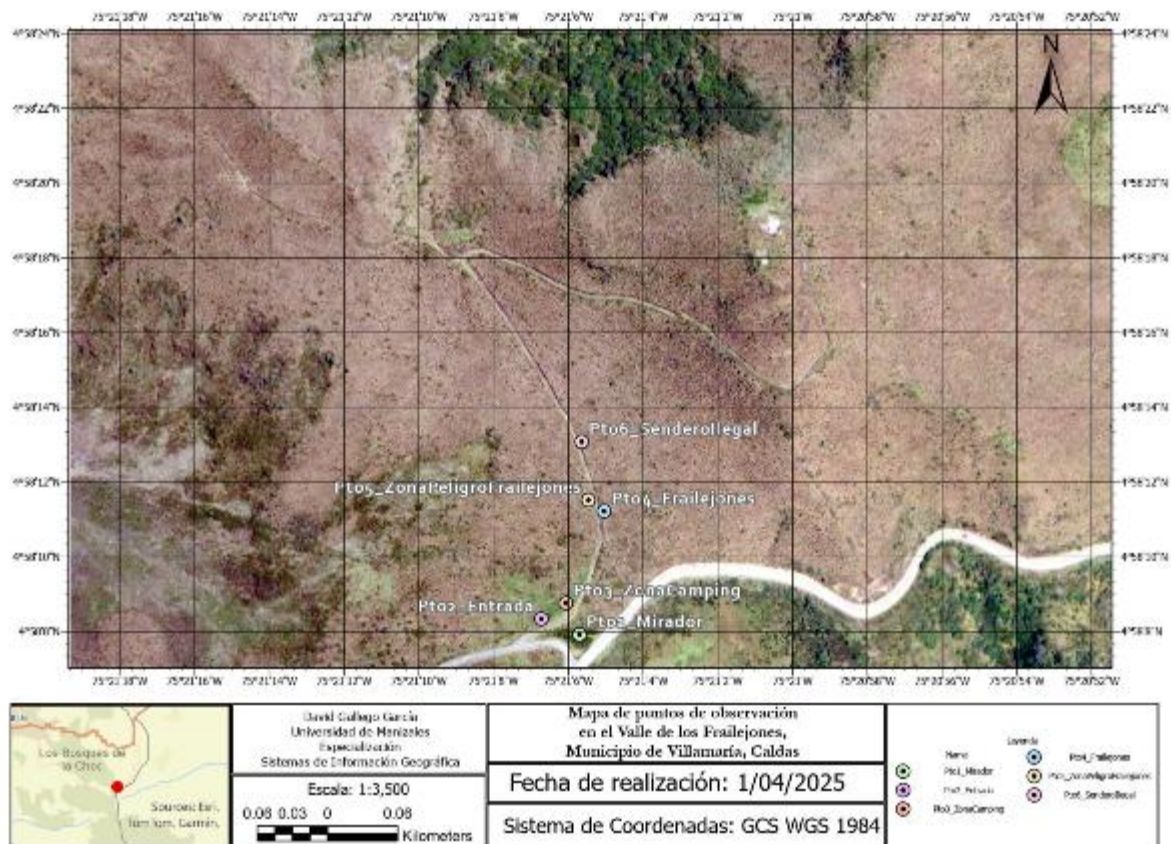
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

El Modelo Digital de Elevación mejorado fue utilizado como base para la identificación de áreas vulnerables dentro del ecosistema de páramo, permitiendo correlacionar las características del relieve con la vulnerabilidad a los impactos generados por la afluencia de turistas.

Recopilación de Datos de Puntos de Interés

Además del DEM, se realizaron trabajos de campo para recopilar datos sobre puntos de interés específicos dentro de la zona de estudio. Estos puntos fueron seleccionados en función de las actividades turísticas que se llevan a cabo en el ecosistema, como el senderismo, el camping, y el contacto directo con los frailejones, los cuales son de particular interés debido a su fragilidad. Se identificaron seis puntos estratégicos dentro de la zona de estudio, que reflejan con precisión la presencia y el impacto de los turistas en las áreas más sensibles del páramo.

Figura 9
Puntos zona de estudio



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Selección de los puntos de observación.

Los puntos fueron seleccionados basándose en las actividades más comunes que los turistas realizan al transitar por el Parque Nacional Natural Los Nevados. Estos puntos de observación permiten una representación más clara de las áreas de mayor interacción humana, lo que contribuye

a una evaluación precisa de los impactos y a la generación de un mapa de vulnerabilidad que sirva como herramienta de gestión para la protección de los frailejones y otros elementos del ecosistema.

La selección de los puntos de observación se centra en áreas críticas previamente identificadas mediante trabajo de campo y observación directa de las dinámicas turísticas más intensas dentro del Valle de los Frailejones. Aunque la cobertura espacial puede parecer limitada, esta decisión metodológica responde a la necesidad de focalizar el análisis en zonas con mayor presión antrópica documentada, donde los impactos del turismo son más evidentes y recurrentes. La distribución agrupada de los puntos no es aleatoria, sino estratégica: corresponde a los sectores con mayor impacto antrópico en el área evaluada, la presencia de actividades no reguladas como acampadas y tránsito por senderos no autorizados, así como a los sitios con mayor densidad de frailejones, cuya vulnerabilidad se pretende evaluar. Además, estos puntos representan unidades clave dentro del área de estudio para el levantamiento de datos primarios georreferenciados que, aunque localizados, permiten una interpretación espacial representativa de las amenazas observadas. Este enfoque permite maximizar la eficiencia en la recolección de datos, dada la limitada accesibilidad del terreno y las restricciones de tiempo y recursos logísticos.

Definición de los puntos de observación

Se definieron seis puntos específicos para el análisis del turismo en la zona, los cuales fueron seleccionados no solo por su afluencia, sino también por el riesgo ambiental que representan. Los puntos seleccionados fueron:

Pto1_Mirador: Punto estratégico con vista panorámica del valle, donde los turistas suelen detenerse para tomar fotografías y disfrutar del paisaje.

Pto2_Entrada: Acceso principal al área, donde se registran los primeros contactos de los turistas con el ecosistema.

Pto3_ZonaCamping: Área utilizada para acampar, que presenta impactos asociados a fogatas y residuos generados por los visitantes.




Pto4_Frailejones: Sector con alta concentración de frailejones, donde se monitorea el contacto directo con esta especie vulnerable.

Pto5_ZonaPeligroFrailejones: Área sensible en riesgo debido a la presencia de turistas que alteran la vegetación y contribuyen a la erosión del suelo.

Pto6_SenderoIlegal: Sendero no autorizado, creado por el tránsito frecuente de turistas y vehículos 4x4, que afecta negativamente la flora y fauna del área.

Cada uno de estos puntos fue marcado con una coloración distintiva en el sistema GIS, lo que facilita su identificación y permite la visualización de los impactos en el mapa. Los puntos fueron georreferenciados mediante el uso de la herramienta GPS ESSENTIALS, que garantizó la precisión y exactitud en la localización de los mismos.

Tabla 8
Descripción puntos de observación

Punto de Observación	Pto1_Mirador	Pto2_Entrada	Pto3_ZonaCamping
Descripción	Punto estratégico con vista panorámica del valle. Se observan turistas tomando fotografías y descansando.	Acceso principal a la zona. Se registran ingresos y comportamiento inicial de los visitantes.	Área utilizada para acampar, se observan impacto por fogatas y residuos.
Foto			
Punto de Observación	Pto4_Frailejones	Pto5_ZonaPeligroFrailejones	Pto6_SenderoIlegal
Descripción	Sector con alta densidad de frailejones, se monitorea el contacto de turistas con la vegetación.	Área sensible con frailejones en riesgo, sujeta a pisoteo y erosión.	Camino no autorizado creado por el tránsito frecuente de turistas y vehículos 4x4.



La tabla 8 presenta una descripción detallada de los puntos de observación seleccionados en el Valle de los Frailejones, utilizados durante las salidas de campo. Cada punto de observación se eligió en función de su relevancia para el estudio, permitiendo analizar el comportamiento de los turistas y sus acciones en diversas áreas del ecosistema. En la tabla se incluye la descripción de cada punto de observación, que abarca desde zonas de alta afluencia, como el mirador y las zonas de camping, hasta áreas sensibles y de riesgo, como los frailejones y las zonas de senderos ilegales.

En la Tabla 9 se presenta la ubicación de los puntos de observación utilizados para el análisis. En ella se incluyen las coordenadas geográficas (longitud y latitud) de cada punto, junto con su altitud en metros sobre el nivel del mar.

Tabla 9*Ubicación puntos de observación*

Nombre	Longitud	Latitud	Altura (m)
Pto1_Mirador	-75.3515833	4.96886667	4027.0176
Pto2_Entrada	-75.3518667	4.96898333	4027.3224
Pto3_ZonaCamping	-75.3516833	4.9691	4028.5416
Pto4_Frailejones	-75.3514	4.96978333	4031.8944
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	-75.3515167	4.96986667	4029.456
Pto6_SenderoIlegal	-75.3515667	4.9703	4031.8944

Tabla 10*Número de personas que ingresaron en la zona de estudio*

Nombre	Fecha	Cantidad Personas
Pto1_Mirador	3/08/2024	33
Pto1_Mirador	4/08/2024	33
Pto1_Mirador	17/08/2024	44
Pto1_Mirador	18/08/2024	54

Pto1_Mirador	19/08/2024	42
Pto1_Mirador	24/08/2024	24
Pto1_Mirador	25/08/2024	35
Pto1_Mirador	1/09/2024	66
Pto1_Mirador	7/09/2024	17
Pto1_Mirador	8/09/2024	54
Pto1_Mirador	14/09/2024	32
Pto1_Mirador	15/09/2024	45
Pto1_Mirador	21/09/2024	32
Pto1_Mirador	22/09/2024	47
Pto1_Mirador	29/09/2024	35
Pto1_Mirador	5/10/2024	26
Pto1_Mirador	6/10/2024	65
Pto1_Mirador	10/10/2024	12
Pto1_Mirador	11/10/2024	26
Pto1_Mirador	12/10/2024	25
Pto1_Mirador	13/10/2024	22
Pto1_Mirador	14/10/2024	56
Pto1_Mirador	19/10/2024	37
Pto1_Mirador	20/10/2024	50
Pto1_Mirador	26/10/2024	13
Pto1_Mirador	27/10/2024	41
Pto2_Entrada	3/08/2024	25
Pto2_Entrada	4/08/2024	42
Pto2_Entrada	17/08/2024	34
Pto2_Entrada	18/08/2024	52
Pto2_Entrada	19/08/2024	42
Pto2_Entrada	24/08/2024	16
Pto2_Entrada	25/08/2024	35
Pto2_Entrada	1/09/2024	54
Pto2_Entrada	7/09/2024	21
Pto2_Entrada	8/09/2024	41
Pto2_Entrada	14/09/2024	30
Pto2_Entrada	15/09/2024	61
Pto2_Entrada	21/09/2024	38
Pto2_Entrada	22/09/2024	31
Pto2_Entrada	29/09/2024	42
Pto2_Entrada	5/10/2024	26
Pto2_Entrada	6/10/2024	48
Pto2_Entrada	10/10/2024	5
Pto2_Entrada	11/10/2024	20

Pto2_Entrada	12/10/2024	34
Pto2_Entrada	13/10/2024	20
Pto2_Entrada	14/10/2024	53
Pto2_Entrada	19/10/2024	30
Pto2_Entrada	20/10/2024	48
Pto2_Entrada	26/10/2024	15
Pto2_Entrada	27/10/2024	38
Pto3_ZonaCamping	3/08/2024	25
Pto3_ZonaCamping	4/08/2024	39
Pto3_ZonaCamping	17/08/2024	40
Pto3_ZonaCamping	18/08/2024	44
Pto3_ZonaCamping	19/08/2024	59
Pto3_ZonaCamping	24/08/2024	23
Pto3_ZonaCamping	25/08/2024	50
Pto3_ZonaCamping	1/09/2024	54
Pto3_ZonaCamping	7/09/2024	29
Pto3_ZonaCamping	8/09/2024	40
Pto3_ZonaCamping	14/09/2024	28
Pto3_ZonaCamping	15/09/2024	38
Pto3_ZonaCamping	21/09/2024	41
Pto3_ZonaCamping	22/09/2024	32
Pto3_ZonaCamping	29/09/2024	30
Pto3_ZonaCamping	5/10/2024	19
Pto3_ZonaCamping	6/10/2024	66
Pto3_ZonaCamping	10/10/2024	8
Pto3_ZonaCamping	11/10/2024	22
Pto3_ZonaCamping	12/10/2024	15
Pto3_ZonaCamping	13/10/2024	21
Pto3_ZonaCamping	14/10/2024	65
Pto3_ZonaCamping	19/10/2024	30
Pto3_ZonaCamping	20/10/2024	71
Pto3_ZonaCamping	26/10/2024	11
Pto3_ZonaCamping	27/10/2024	41
Pto4_Frailejones	3/08/2024	17
Pto4_Frailejones	4/08/2024	41
Pto4_Frailejones	17/08/2024	42
Pto4_Frailejones	18/08/2024	56
Pto4_Frailejones	19/08/2024	40
Pto4_Frailejones	24/08/2024	31
Pto4_Frailejones	25/08/2024	47
Pto4_Frailejones	1/09/2024	50

Pto4_Frailejones	7/09/2024	20
Pto4_Frailejones	8/09/2024	46
Pto4_Frailejones	14/09/2024	32
Pto4_Frailejones	15/09/2024	46
Pto4_Frailejones	21/09/2024	36
Pto4_Frailejones	22/09/2024	47
Pto4_Frailejones	29/09/2024	48
Pto4_Frailejones	5/10/2024	24
Pto4_Frailejones	6/10/2024	63
Pto4_Frailejones	10/10/2024	12
Pto4_Frailejones	11/10/2024	25
Pto4_Frailejones	12/10/2024	2
Pto4_Frailejones	13/10/2024	20
Pto4_Frailejones	14/10/2024	66
Pto4_Frailejones	19/10/2024	44
Pto4_Frailejones	20/10/2024	51
Pto4_Frailejones	26/10/2024	27
Pto4_Frailejones	27/10/2024	44
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	3/08/2024	12
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	4/08/2024	44
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	17/08/2024	37
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	18/08/2024	36
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	19/08/2024	43
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	24/08/2024	24
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	25/08/2024	32
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	1/09/2024	54
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	7/09/2024	26
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	8/09/2024	52
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	14/09/2024	28
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	15/09/2024	56
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	21/09/2024	38
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	22/09/2024	45
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	29/09/2024	46
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	5/10/2024	14
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	6/10/2024	55
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	10/10/2024	12
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	11/10/2024	17
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	12/10/2024	3
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	13/10/2024	28
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	14/10/2024	51
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	19/10/2024	30

Pto5_ZonaPeligroFrailejones	20/10/2024	56
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	26/10/2024	20
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	27/10/2024	45
Pto6_SenderoIlegal	3/08/2024	30
Pto6_SenderoIlegal	4/08/2024	53
Pto6_SenderoIlegal	17/08/2024	41
Pto6_SenderoIlegal	18/08/2024	49
Pto6_SenderoIlegal	19/08/2024	66
Pto6_SenderoIlegal	24/08/2024	20
Pto6_SenderoIlegal	25/08/2024	29
Pto6_SenderoIlegal	1/09/2024	54
Pto6_SenderoIlegal	7/09/2024	33
Pto6_SenderoIlegal	8/09/2024	66
Pto6_SenderoIlegal	14/09/2024	34
Pto6_SenderoIlegal	15/09/2024	50
Pto6_SenderoIlegal	21/09/2024	34
Pto6_SenderoIlegal	22/09/2024	26
Pto6_SenderoIlegal	29/09/2024	41
Pto6_SenderoIlegal	5/10/2024	27
Pto6_SenderoIlegal	6/10/2024	69
Pto6_SenderoIlegal	10/10/2024	16
Pto6_SenderoIlegal	11/10/2024	23
Pto6_SenderoIlegal	12/10/2024	21
Pto6_SenderoIlegal	13/10/2024	17
Pto6_SenderoIlegal	14/10/2024	51
Pto6_SenderoIlegal	19/10/2024	32
Pto6_SenderoIlegal	20/10/2024	62
Pto6_SenderoIlegal	26/10/2024	18
Pto6_SenderoIlegal	27/10/2024	35

La tabla 10 muestra la cantidad de personas que ingresaron en diferentes puntos de observación del Valle de los Frailejones, desde el 3 de agosto hasta el 27 de octubre de 2024. Estos puntos incluyen áreas clave que fueron monitorizados para evaluar la afluencia de turistas en cada una de las zonas. La tabla detalla las fechas específicas en las que se registraron las visitas, así como la cantidad de personas que accedieron a cada zona. Los datos proporcionan una visión clara de la distribución temporal de las visitas y ayudan a analizar el flujo de turistas en relación con los impactos ambientales observados durante las observaciones.

En la tabla 11 se muestra el total acumulado de personas registrado:

Tabla 11*Total Acumulado de personas en los puntos de interés*

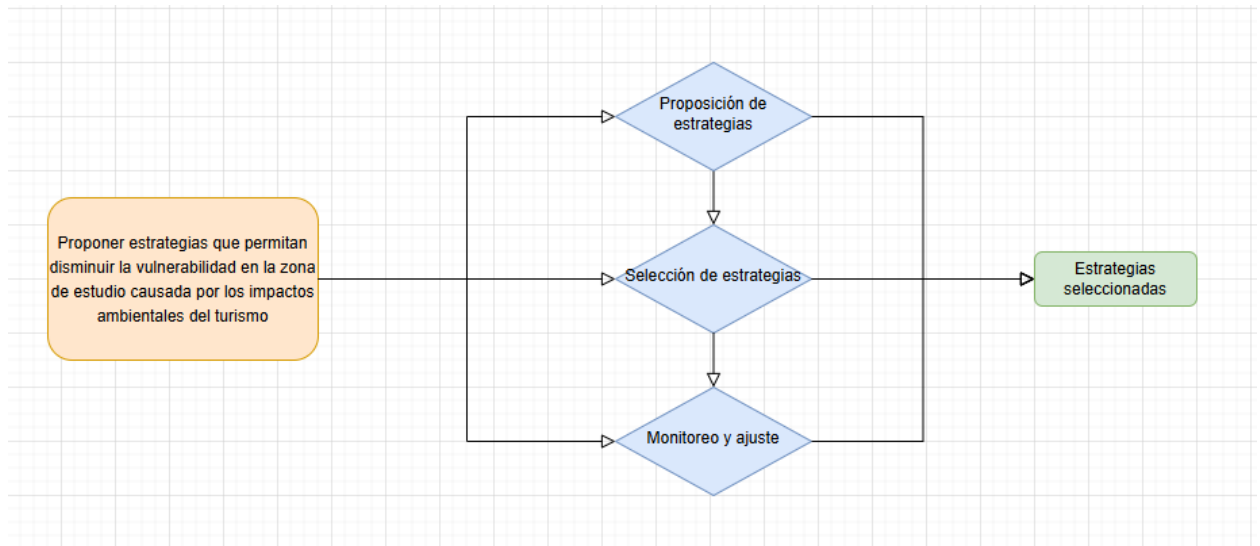
Nombre	Longitud	Latitud	Altura (m)	Cantidad Personas
Pto1_Mirador	-75.3515833	4.96886667	4027.0176	966
Pto2_Entrada	-75.3518667	4.96898333	4027.3224	901
Pto3_ZonaCamping	-75.3516833	4.9691	4028.5416	941
Pto4_Frailejones	-75.3514	4.96978333	4031.8944	977
Pto5_ZonaPeligroFrailejones	-75.3515167	4.96986667	4029.456	904
Pto6_SenderoIlegal	-75.3515667	4.9703	4031.8944	997

En total se registraron 5686 personas en el periodo desde el 3 de agosto hasta el 27 de octubre de 2024

6.3.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo

El diagrama de flujo (Figura 10.) corresponde al Objetivo Específico 3, que es la proposición de estrategias para disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo. Este proceso comienza con la proposición de estrategias, donde se definen diferentes alternativas para mitigar los impactos del turismo en el ecosistema de páramo. Luego, se procede a la selección de las estrategias más adecuadas, tomando en cuenta su viabilidad y efectividad. Finalmente, se establece un monitoreo y ajuste para evaluar la implementación de las estrategias seleccionadas y realizar los ajustes necesarios para garantizar su efectividad a largo plazo.

Figura 10
Diagrama de flujo objetivo específico 3



Fuente: Propia (DrawIO)

Propuestas de Estrategias para la Mitigación de los Impactos Ambientales

A partir de los análisis obtenidos, se propondrán diversas estrategias enfocadas en reducir los efectos negativos del turismo sobre el ecosistema. Entre las propuestas se incluye la regulación de la cantidad de visitantes en zonas sensibles, mediante la implementación de límites diarios para preservar la integridad ecológica de los ecosistemas. Además, se propone la creación de senderos delimitados que concentren el tránsito turístico, minimizando la perturbación de hábitats frágiles y favoreciendo la conservación de la biodiversidad. También se diseñan campañas de sensibilización para turistas y operadores turísticos, promoviendo prácticas responsables y respetuosas con el medio ambiente. Martínez, López y Torres (2018) resaltan la necesidad de controlar la afluencia turística como medida clave para mitigar los impactos sobre los ecosistemas, lo cual es esencial en el diseño de estas estrategias.

Selección Final de Estrategias

Una vez definidas las estrategias, se lleva a cabo una selección final, que incluye consultas con autoridades locales y comunidades para adaptar las propuestas a las realidades y necesidades del territorio. Se toman en cuenta sus opiniones y se ajustan las estrategias en función de su viabilidad y aceptación.

Monitoreo Continuo y Ajuste de Estrategias

Se sugiere implementar un sistema de monitoreo continuo que permita evaluar la efectividad de las estrategias a lo largo del tiempo. Este sistema utilizaría tecnologías avanzadas, como drones (con la debida autorización de la Corporación Autónoma Regional de Caldas) y cámaras, para hacer un seguimiento detallado de las actividades turísticas y su impacto en el ecosistema. Además, se incentivará la participación activa de las comunidades locales en el proceso de monitoreo, fortaleciendo su papel en la conservación y gestión sostenible del territorio. De acuerdo con Pérez et al. (2019), el uso de monitoreo participativo con tecnologías avanzadas ha mostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la gestión de ecosistemas frágiles, lo que será clave para garantizar la protección a largo plazo del Valle de los Frailejones.

7. Resultados

Los resultados presentados derivan de un análisis exhaustivo realizado con el propósito de comprender y abordar los impactos ambientales generados por el turismo en el ecosistema de páramo del Valle de los Frailejones, en Villamaría, Caldas. Este análisis se fundamenta en la identificación de las principales actividades turísticas que pueden desencadenar alteraciones en el entorno, así como en la evaluación de la vulnerabilidad geoespacial de la zona mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, se han formulado propuestas estratégicas orientadas a mitigar dichos impactos, con el fin de reducir la vulnerabilidad del ecosistema y fomentar una gestión más sostenible del turismo en la región

7.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.

Las acciones identificadas en este estudio fueron seleccionadas en función de su alta frecuencia de realización por parte de los turistas durante las salidas de campo a través de observaciones directas y registros sistemáticos. Estas acciones no solo reflejan el comportamiento habitual de los visitantes, sino que también tienen el potencial de generar impactos negativos significativos sobre el ecosistema de páramo.

Las acciones identificadas para este análisis fueron las siguientes:

- Camping ilegal
- Senderismo ilegal
- Generación de residuos
- Perturbación sonora
- Vuelo de drones

Estas variables se identificaron como potenciales desencadenantes de impactos ambientales en el ecosistema de páramo. Tras la recolección y sistematización de la información, se obtuvo una tabla que muestra las principales actividades registradas durante los días de observación, las cuales reflejan la presencia de estas acciones en diferentes momentos del estudio.

A continuación, se presentan los registros de las acciones observadas en función de las fechas de visita:

Tabla 12
Cantidad de acciones registradas por día

FECHA	Camping ilegal	Senderismo ilegal	Generación de residuos	Perturbación sonora	Vuelo de drones
3/08/2024		x	x		
4/08/2024	x	x	x		
17/08/2024		x		x	x
18/08/2024		x	x		
19/08/2024		x			

24/08/2024		x			
25/08/2024		x	x		
1/09/2024		x	x		
7/09/2024		x	x		
8/09/2024		x	x		x
14/09/2024	x	x	x		
15/09/2024		x			
21/09/2024		x	x		
22/09/2024		x		x	
29/09/2024		x	x		
5/10/2024		x			
6/10/2024		x	x		
10/10/2024		x	x		
11/10/2024		x	x		x
12/10/2024		x	x	x	x
13/10/2024		x	x		
14/10/2024		x			
19/10/2024		x	x		
20/10/2024	x	x	x	x	x
26/10/2024		x	x		
27/10/2024		x	x		

Una vez sistematizada la información de la tabla 12, se realizó el análisis de la presencia de cada acción. Para definir qué acciones pueden ser consideradas como detonantes de impactos ambientales, se adoptó un umbral de presencia del 10%. Es decir, cualquier acción con una frecuencia inferior al 10% fue descartada como factor significativo en la generación de impactos.

Tabla 13
Porcentaje de Presencia de las acciones.

Camping ilegal	Senderismo ilegal	Generación de residuos	Perturbación sonora	Vuelo de drones
11.5384	100	73.0769	15.3846	19.2307

Como se puede observar en la tabla 13, el senderismo ilegal es la acción con mayor porcentaje de presencia; con una presencia del 100% en los registros, lo que indica que esta actividad es la más frecuente entre los turistas en la zona de estudio. En segundo lugar, la

generación de residuos tiene una alta frecuencia de aparición, con un porcentaje de invasión del 73.08%. Por otro lado, acciones como la perturbación sonora, el vuelo de drones y el camping ilegal presentaron una baja presencia, con valores cercanos al umbral mínimo establecido, aun así, fueron tomados en consideración como factores significativos.

Impactos Ambientales Asociados a las Acciones Registradas

A partir de los resultados obtenidos, se identificaron varios impactos ambientales generados por las actividades turísticas en el Valle de los Frailejones, los cuales tienen el potencial de desencadenar efectos negativos en este ecosistema de páramo si no se gestionan de manera adecuada. Las acciones realizadas de forma no controlada o ilegal pueden contribuir significativamente al deterioro de este ecosistema frágil, que es altamente susceptible a las perturbaciones causadas por las actividades humanas.

El impacto por densidad turística es uno de los más evidentes cuando el número de visitantes en un área supera su capacidad de carga, lo que genera una presión excesiva sobre los recursos naturales. Las actividades turísticas contribuyen a este impacto al concentrar a los turistas en áreas sensibles. Esta concentración puede provocar la compactación del suelo, la alteración de la vegetación y una mayor acumulación de residuos, lo que deteriora aún más el ambiente natural. Además, la afectación a la biodiversidad es otro impacto directo de las actividades turísticas. El daño a los hábitats naturales esenciales para las especies locales, incluidos los frailejones, pone en riesgo la biodiversidad del ecosistema.

Por otro lado, la contaminación del agua es otro de los impactos graves asociados a estas actividades turísticas. El turismo a menudo ocurre cerca de fuentes de agua, lo que aumenta el riesgo de contaminación de ríos, lagos y humedales. La generación de residuos en estas zonas también puede contaminar las aguas superficiales, ya sea a través de la acumulación de residuos sólidos o por la liberación de productos químicos peligrosos que los turistas pueden dejar en el

entorno. Esta contaminación afecta no solo a las especies acuáticas, sino también a los seres humanos que dependen de estos recursos para su consumo.

El incremento del riesgo de incendios en los ecosistemas de páramo es otra consecuencia de las actividades turísticas no reguladas. Las actividades turísticas, especialmente cuando se realizan sin medidas de seguridad adecuadas, son una de las principales causas de incendios forestales en estas áreas. Además, la acumulación de residuos, particularmente los orgánicos y plásticos, contribuye a la propagación de incendios, al acumularse en el suelo o en áreas de alta vegetación seca. Los incendios forestales no solo destruyen la vegetación, sino que también afectan gravemente a las especies que dependen de estos hábitats para su supervivencia.

Finalmente, la alteración del suelo y la vegetación es un impacto evidente y recurrente de las actividades turísticas en áreas frágiles como los páramos. El senderismo provoca la erosión del suelo, especialmente cuando los turistas caminan fuera de los senderos establecidos, lo que lleva a la pérdida de cobertura vegetal y la compactación del suelo. De manera similar, las actividades generan alteraciones al suelo debido a la creación de campamentos en zonas no autorizadas, lo que contribuye a la degradación de la vegetación y la pérdida de su capacidad para recuperarse. Además, los residuos dejados por los turistas alteran la composición del suelo, dificultando el crecimiento de nuevas plantas y afectando negativamente la estructura ecológica del área.

Luego de todo el proceso de identificación, se obtuvieron los siguientes impactos ambientales:

- Impacto por Densidad Turística
- Afectación a la Biodiversidad
- Contaminación del Agua
- Incremento del Riesgo de Incendios

- Alteración del Suelo y la Vegetación

Luego haber identificado estos impactos, se hace la relación entre las acciones y dichos impactos:

Tabla 14

Relación de las acciones y los impactos.

Impactos Ambientales	Camping ilegal	Senderismo ilegal	Generación de residuos	Perturbación sonora	Vuelo de drones
Impacto por Densidad Turística	x	x	x		
Afectación a la Biodiversidad	x	x	x	x	x
Contaminación del Agua	x	x	x		
Incremento del Riesgo de Incendios	x	x	x		x
Alteración del Suelo y la Vegetación	x	x	x		

Las acciones marcadas con una "X" en la tabla 14. son consideradas detonantes de los impactos ambientales correspondientes, ya que influyen directamente en la alteración o deterioro

de los ecosistemas. A continuación, se realiza un análisis de cada una de las acciones y su relación con los impactos ambientales:

Impacto por Densidad Turística:

El camping ilegal, el senderismo ilegal y la generación de residuos son actividades que incrementan la afluencia de personas en áreas naturales, lo que provoca un aumento de la densidad turística. Cuando las personas acceden a estos lugares sin las regulaciones adecuadas, como el control de cantidad de visitantes o las zonas habilitadas para actividades, se sobrecarga el entorno natural. Este aumento de la densidad turística puede generar un efecto negativo al desbordar la capacidad de carga del ecosistema, con la consiguiente alteración de los recursos naturales, el daño a los hábitats y la disminución de la calidad del paisaje.

Afectación a la Biodiversidad:

El camping ilegal y el senderismo ilegal tienen un impacto directo sobre la biodiversidad. Ambas actividades pueden causar la alteración de los hábitats naturales, la fragmentación de ecosistemas y el estrés sobre las especies locales, ya que las personas que practican estas actividades suelen transitar por zonas no autorizadas, dañando la flora y fauna. Además, la generación de residuos contribuye a la contaminación de estos espacios, lo que afecta negativamente la vida silvestre, ya sea a través de la ingestión de desechos, la destrucción de hábitats o la alteración de los ciclos naturales. La perturbación sonora, causada por las actividades de las personas y el ruido generado por la presencia humana, también tiene un impacto significativo en la biodiversidad, ya que muchos animales dependen de la quietud para comportamientos vitales como la reproducción, la caza o el descanso. Adicional el ruido generado por el vuelo de drones puede estresar a las especies y alterar su comportamiento, afectando sus procesos naturales.

Contaminación del Agua:

Las actividades de camping ilegal, senderismo ilegal y la generación de residuos pueden ser fuentes directas de contaminación del agua en áreas naturales. El camping ilegal puede provocar

la contaminación de cuerpos de agua por desechos orgánicos, como restos de comida o agua residual no tratada, mientras que el senderismo ilegal también puede contribuir al deterioro de las fuentes hídricas debido al paso de personas en lugares sensibles. La acumulación de residuos, especialmente plásticos y otros contaminantes, puede llegar a los ríos y lagos cercanos, afectando la calidad del agua y poniendo en riesgo la vida acuática.

Incremento del Riesgo de Incendios:

El camping ilegal y el senderismo ilegal aumentan significativamente el riesgo de incendios forestales. Las fogatas mal apagadas, la disposición inapropiada de materiales inflamables o el simple hecho de que los visitantes no cumplan con las normativas de seguridad en cuanto a la prevención de incendios puede ser suficiente para iniciar un fuego en zonas de alta vulnerabilidad. Además, la generación de residuos puede contribuir al riesgo de incendios si los desechos incluyen materiales fácilmente combustibles. El vuelo de drones también es una actividad que puede incrementar el riesgo de incendios, ya que los drones pueden generar chispas o fallos técnicos que podrían encender fuego en zonas secas o sensibles. Los incendios forestales no solo destruyen la vegetación, sino que también ponen en peligro la fauna y el equilibrio del ecosistema en general.

Alteración del Suelo y la Vegetación:

El camping ilegal, el senderismo ilegal y la generación de residuos son actividades que afectan directamente al suelo y la vegetación en áreas naturales. El paso constante de personas en zonas no autorizadas puede causar la compactación del suelo, lo que impide la infiltración de agua y favorece la erosión. Además, las zonas de camping ilegales pueden eliminar vegetación debido a la recolección de leña o la alteración de la cobertura vegetal para instalar tiendas y otros elementos. Los residuos, especialmente los plásticos y metales, pueden quedar atrapados en el suelo, impidiendo el crecimiento de nuevas plantas y contribuyendo a la degradación del hábitat.

7.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo

El análisis de las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo se realizará utilizando herramientas y procesos SIG, con el objetivo de identificar las áreas más expuestas a los impactos derivados de la actividad turística en el Valle de los Frailejones. Para ello, se llevarán a cabo varios análisis, como el de densidad Kernel para detectar las zonas con mayor concentración de visitantes, el análisis de pendiente para evaluar la estabilidad del terreno, y el análisis de exposición solar para entender las condiciones micro climáticas que influyen en el comportamiento turístico.

El proceso para obtener el mapa de vulnerabilidad se estructurará en tres pasos: el primero será la generación de unos análisis base, en el que se crearán los mapas de cada factor clave, como la vegetación, la pendiente, la exposición solar y la concentración de turistas. Luego, se llevará a cabo una integración de capas, combinando los mapas base a través de reclasificación y álgebra de mapas para asignar pesos a cada factor. Finalmente, se obtendrá el mapa de vulnerabilidad, que integrará toda la información geoespacial y permitirá visualizar las zonas con mayor riesgo de alteración por el turismo, facilitando la toma de decisiones para la gestión y conservación del área.

7.2.1 Generación de análisis base

La Generación de Análisis Base es el primer paso para la obtención del mapa de vulnerabilidad, ya que en esta etapa se realizarán los análisis fundamentales para entender las características del terreno y cómo interactúan los factores ambientales y humanos. Los análisis base incluyen el Análisis de Pendiente, que permite evaluar la inclinación del terreno y su influencia en la estabilidad y accesibilidad; el Análisis de Exposición Solar, que proporciona información sobre la radiación solar que reciben las distintas zonas, lo que afecta tanto al microclima como al comportamiento de los turistas; el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que ayuda a identificar la densidad y salud de la vegetación, un factor clave en la conservación del ecosistema; y el Análisis de Densidad Kernel, que mide la concentración de actividades humanas, especialmente las relacionadas con el turismo, y su impacto potencial en las zonas más vulnerables.

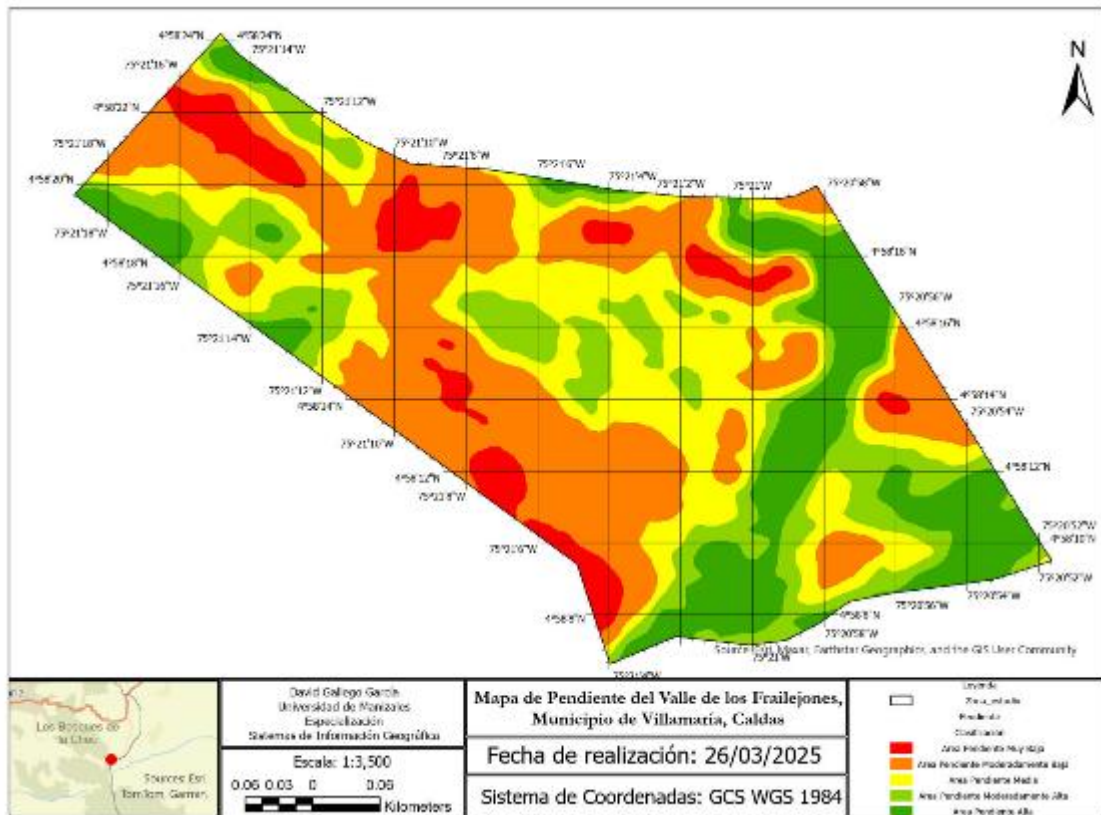
Estos análisis servirán como la base para realizar la integración de capas y obtener finalmente el mapa de vulnerabilidad del área.

Análisis de Pendiente

A continuación, se presenta el análisis de pendiente realizado en el área de estudio. Este análisis tiene como objetivo determinar las diferentes clases de pendiente del terreno a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM), proporcionando información clave sobre la topografía del predio. Para ello, se utilizó la herramienta Pendiente de ArcGIS Pro (Spatial Analyst Tools > Surface > Pendiente).

Los valores de pendiente calculados se clasificaron en cinco categorías, permitiendo así una mejor comprensión de las variaciones del terreno en el área de estudio. Esta clasificación es crucial para comprender cómo las características topográficas del terreno pueden influir en la gestión y conservación del ecosistema, en particular en áreas de páramo como la que se estudia en esta tesis.

Figura 11
 Mapa de pendiente



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

La figura 12 muestra los valores de pendiente clasificados y sus respectivas categorías.

Figura 12
 Clasificación valores pendiente

Color	Upper value	Label
	≤ 10.0	Area Pendiente Muy Baja
	≤ 20.0	Area Pendiente Moderadamente Baja
	≤ 25.0	Area Pendiente Media
	≤ 30.0	Area Pendiente Moderadamente Alta
	≤ 50.0	Area Pendiente Alta

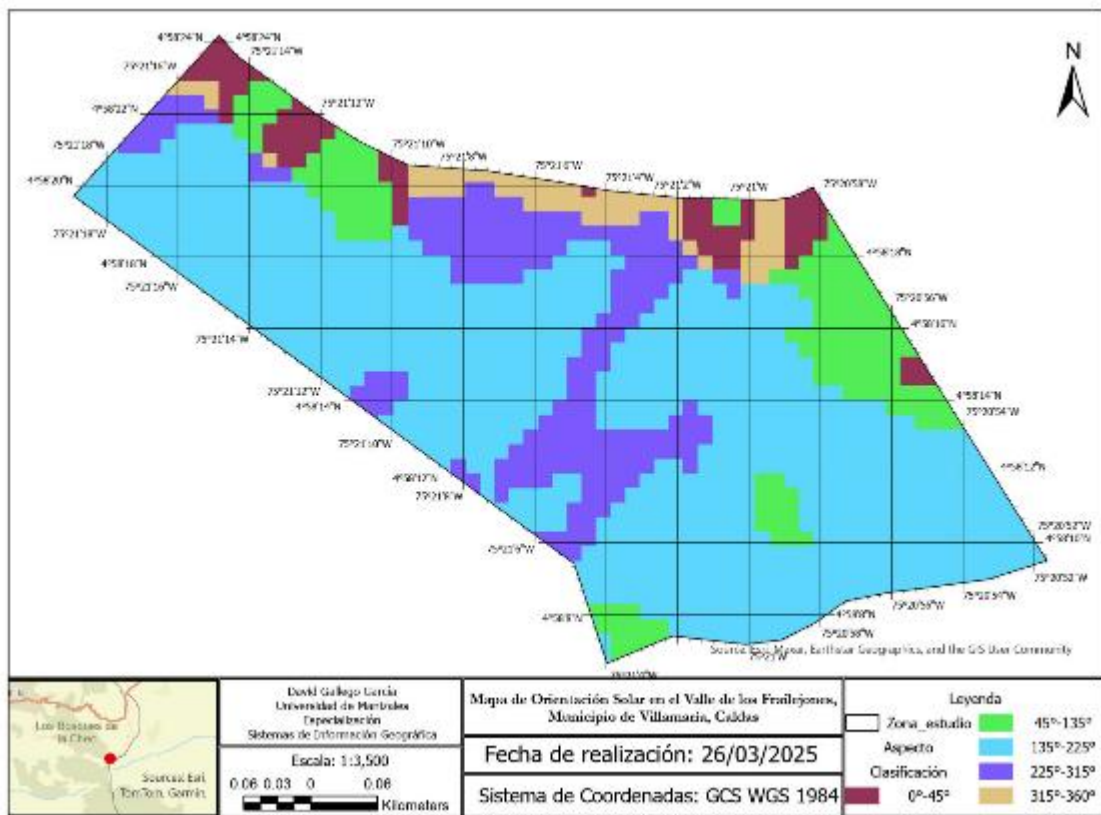
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

El mapa de pendiente (Figura 11.) muestra una gran variabilidad en las inclinaciones del terreno dentro del Valle de los Frailejones. Las áreas de pendiente baja se concentran principalmente en el centro y algunas partes bajas del valle, lo que podría facilitar la accesibilidad y actividad turística. Por otro lado, las zonas con pendiente alta están ubicadas en las áreas periféricas y en las zonas más elevadas, las cuales son más difíciles de acceder, lo que sugiere una menor alteración y una mayor conservación natural en estas áreas. La pendiente tiene un impacto directo sobre la estabilidad del suelo y la posible erosión de las zonas más inclinadas.

Análisis de Exposición Solar

El análisis de exposición es una herramienta fundamental para entender cómo la orientación de las laderas en el área de estudio influye en la exposición solar y las condiciones micro climáticas del terreno. Utilizando la herramienta Aspecto de ArcGIS Pro (Spatial Analyst Tools > Surface > Aspecto), se determinó la orientación de las laderas a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM). Este análisis permite identificar las exposiciones cardinales y clasificar las laderas de acuerdo a su orientación hacia el sol.






Figura 13
Mapa de orientación solar.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 14 se muestran los valores de aspecto clasificados y sus respectivas categorías.

Figura 14*Clasificación valores aspecto*

Color	Upper value	Label
	≤ 45.0	0°-45°
	≤ 135.0	45°-135°
	≤ 225.0	135°-225°
	≤ 315.0	225°-315°
	≤ 360.0	315°-360°

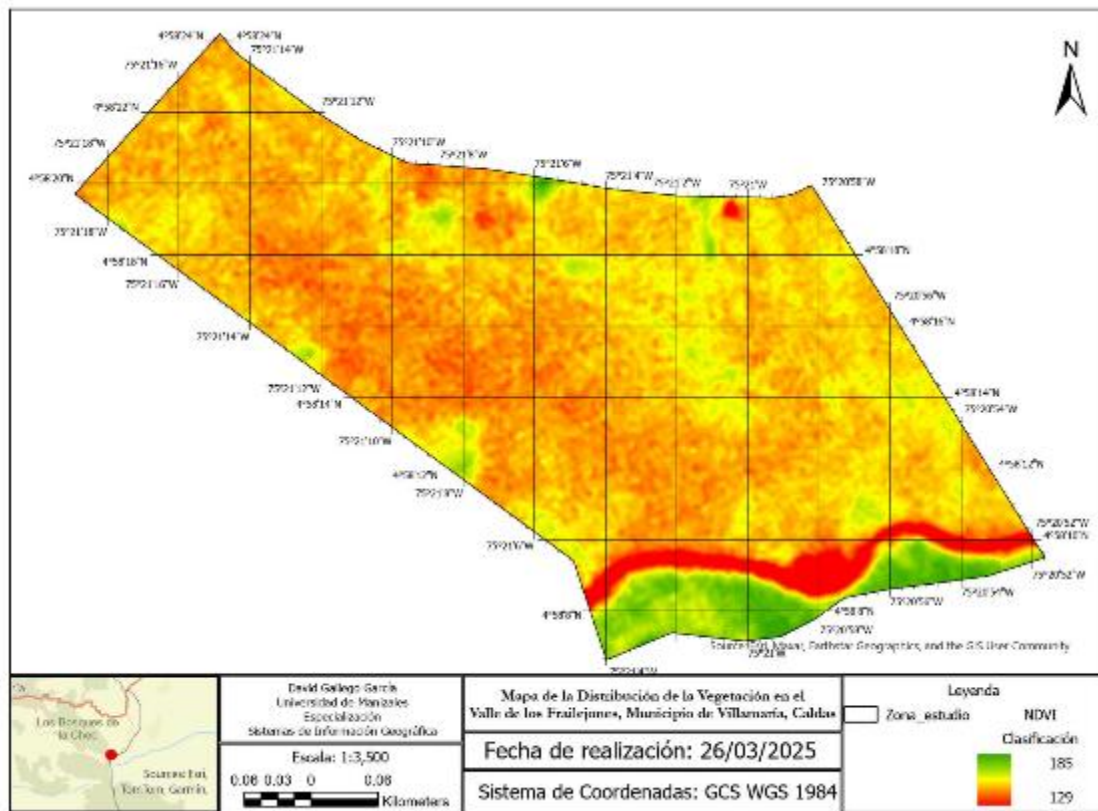
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

El mapa de orientación solar (Figura 13.) muestra la distribución de la radiación solar en el Valle de los Frailejones. Las zonas orientadas hacia el sur (representadas en tonos azul) experimentan una mayor exposición solar, lo que las hace más cálidas y con mayor atractivo para los turistas. Las áreas orientadas al norte (en tonos Vinotinto y beige) tienen una baja exposición solar, lo que favorece condiciones más frías y húmedas. Las áreas intermedias muestran una exposición solar moderada, lo que sugiere que estas zonas podrían tener un equilibrio en las condiciones micro climáticas, favoreciendo una vegetación menos afectada por las fluctuaciones extremas de temperatura.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se calculó utilizando la herramienta NDVI en ArcGIS Pro (Funciones Ráster > Analisis de Imagenes > NDVI) es fundamental para evaluar la salud de la vegetación y la cobertura vegetal en el área de estudio. A través de esta herramienta, se generó un mapa para la visualización del NDVI, sino que también permite una interpretación más clara del relieve del terreno, ayudando a comprender mejor las variaciones topográficas y su relación con la distribución de la vegetación en el Valle de los frailejones.

Figura 15
Mapa de Distribución de la Vegetación



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 16 se muestran los valores del NDVI.

Figura 16
Clasificación NDVI



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

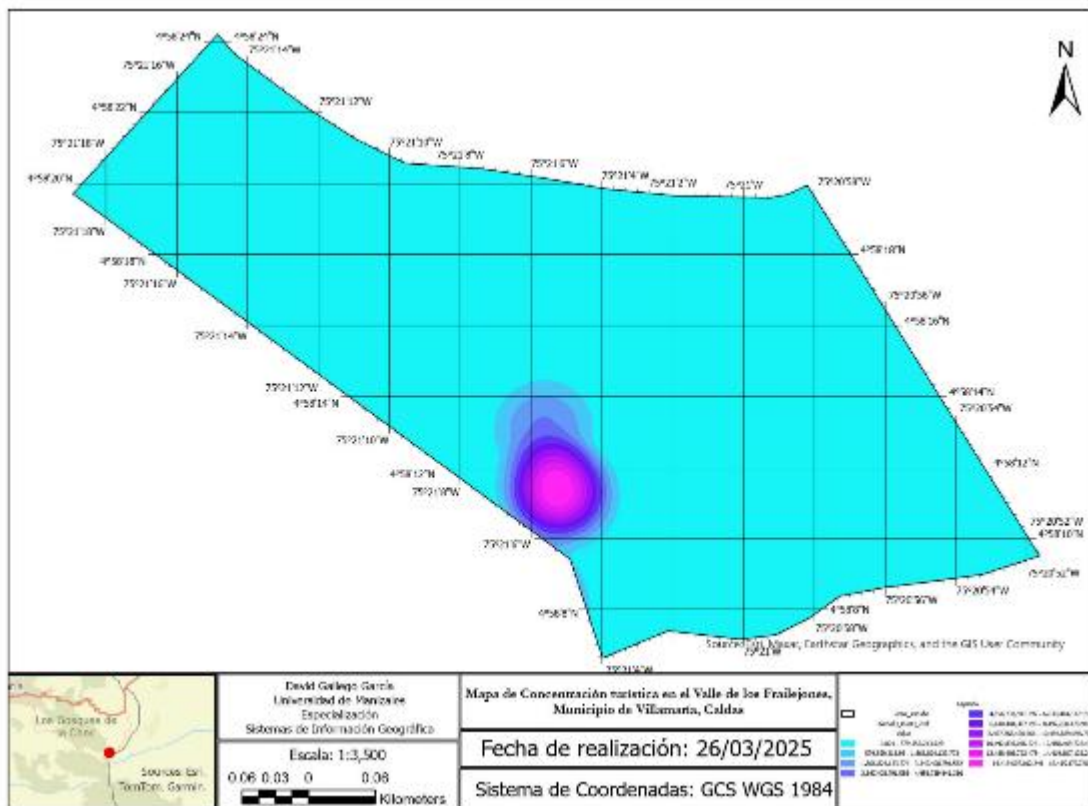
El mapa de NDVI (Figura 15.) revela la distribución de la vegetación en el Valle de los Frailejones, con una clara distinción entre áreas de alta y baja vegetación. Las zonas en verde

representan áreas con vegetación densa y saludable, mientras que las áreas rojas y amarillas indican suelos más desprovistos de vegetación o con vegetación en malas condiciones. Se observa una concentración de áreas con baja vegetación principalmente en la parte inferior del valle, mientras que las zonas más elevadas muestran una mayor densidad de vegetación, lo que sugiere un estado saludable en estas áreas.

Análisis de Densidad Kernel

El Análisis de Densidad Kernel fue realizado para identificar las áreas con mayor concentración de actividad turística en el Valle de los Frailejones. Utilizando la herramienta Kernel Density (ArcGIS Pro: Spatial Analyst Tools > Density > Kernel Density)., se realizó un análisis espacial a partir de los puntos de actividad turística registrados en la zona; Dicho análisis se realizó con la cantidad de personas registradas en los 6 puntos designados como puntos de observación. Este análisis permite visualizar las áreas con mayor concentración de visitantes, lo que es esencial para la planificación del manejo turístico y la evaluación de las posibles implicaciones para la conservación del ecosistema. El mapa muestra una representación visual de las áreas con alta densidad de visitantes (áreas en tonos morados y azules), y las zonas con menor concentración (áreas en tonos más claros), lo que proporciona información clave sobre la distribución espacial del turismo en la región.











Figura 17
Mapa de Concentración turística.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 18 se muestran los valores del análisis de Densidad Kernel.

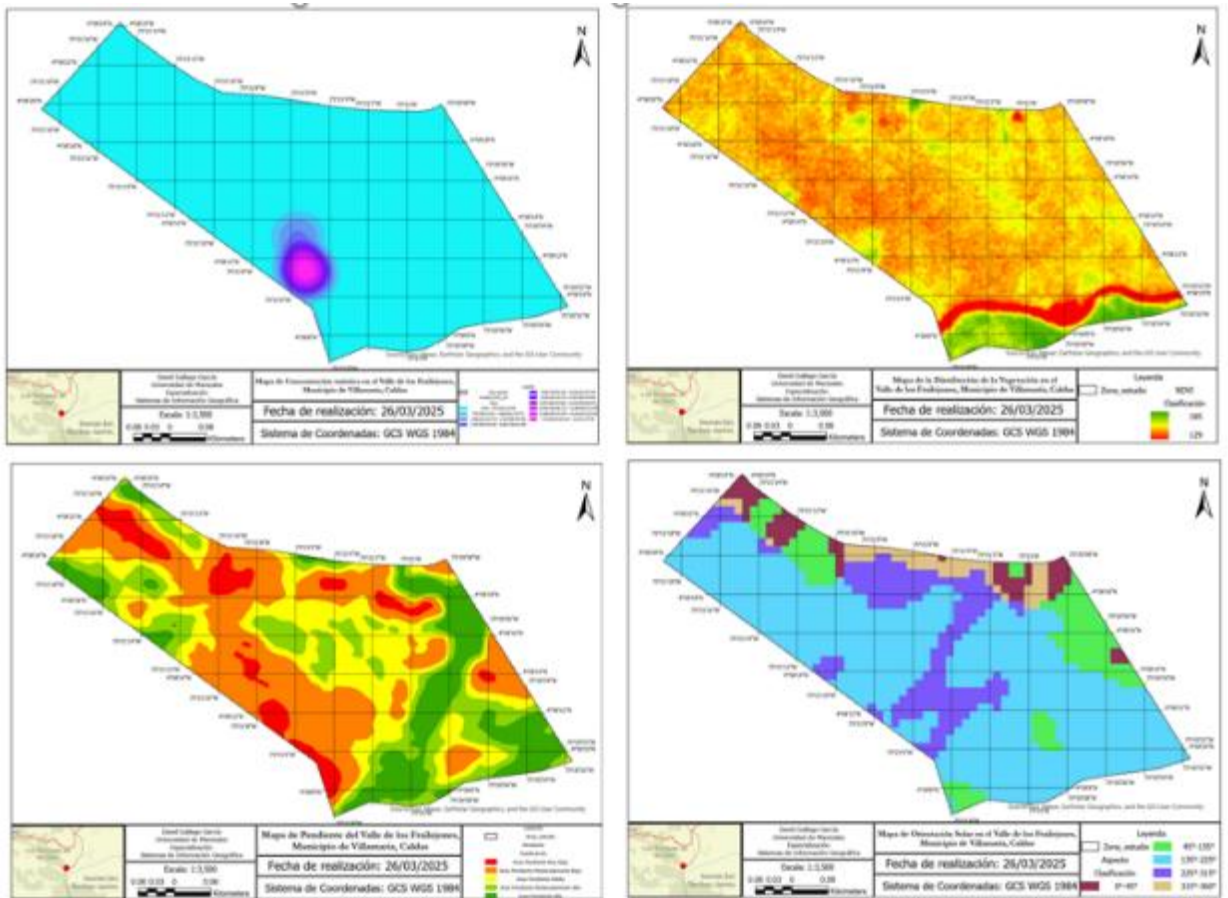
Figura 18*Clasificación Densidad Kernel.*

Color	Upper value	Label
	≤ 579359213.929412	0.001 - 579,359,213.929
	≤ 1866824133.77255	579,359,213.93 - 1,866,824,133.773
	≤ 3347408791.59216	1,866,824,133.774 - 3,347,408,791.592
	≤ 4956739941.39609	3,347,408,791.593 - 4,956,739,941.396
	≤ 6630444337.19217	4,956,739,941.397 - 6,630,444,337.192
	≤ 8497268470.96472	6,630,444,337.193 - 8,497,268,470.965
	≤ 10492839096.7216	8,497,268,470.966 - 10,492,839,096.722
	≤ 12488409722.4785	10,492,839,096.723 - 12,488,409,722.478
	≤ 14419607102.2432	12,488,409,722.479 - 14,419,607,102.243
	≤ 16415177728.0	14,419,607,102.244 - 16,415,177,728

Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

El mapa de concentración turística muestra la distribución espacial de los puntos de alta densidad turística en el Valle de los Frailejones. Las áreas de mayor densidad se encuentran principalmente en la parte centro-sur del área de estudio, indicando que estas zonas concentran una mayor actividad turística, relacionadas a la accesibilidad al predio y con el atractivo de la vegetación. La dispersión se va reduciendo hacia las zonas más alejadas, lo que sugiere que las áreas periféricas no generan interés al turista o son de difícil acceso, manteniendo una densidad más baja.

Figura 19
Mapas Base.



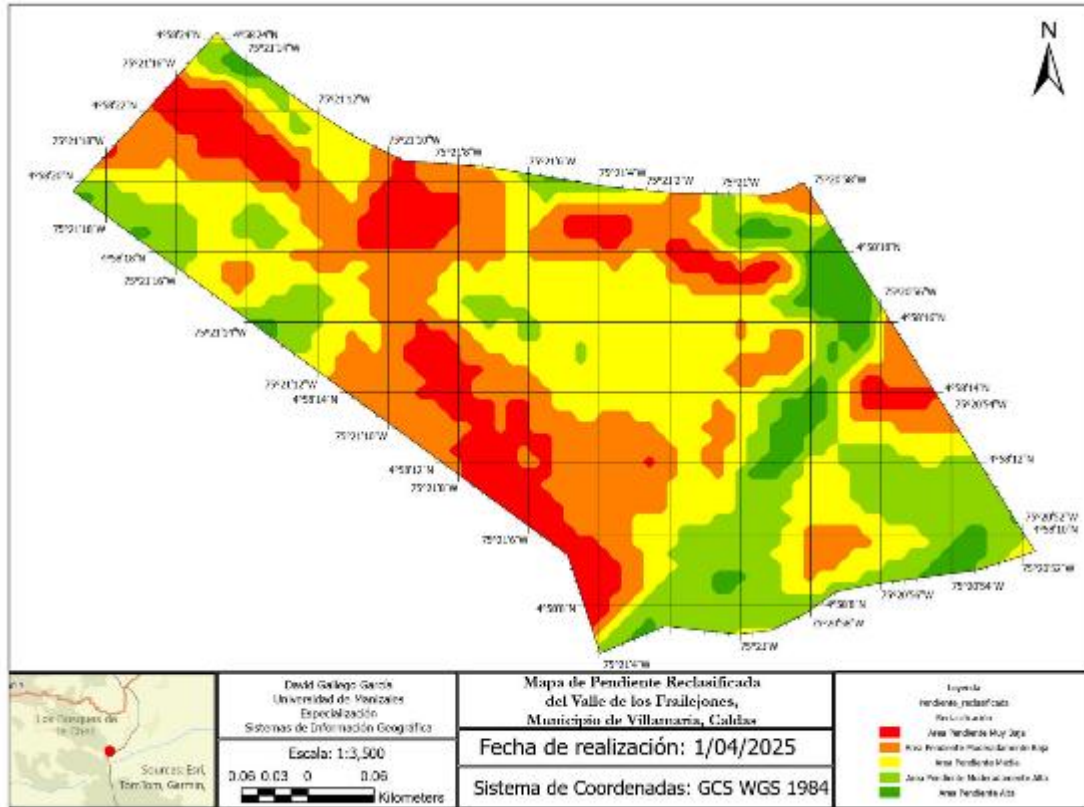
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Reclasificación Mapas Base

Una vez generados los mapas base (Figura 19.), se procede a realizar la reclasificación de cada capa. Este proceso consiste en asignar a cada mapa un valor dentro de una escala del 1 al 5, donde el valor 1 correspondía a las condiciones de menor vulnerabilidad, representando las zonas con menores riesgos, y el valor 5 indicaba las condiciones de mayor vulnerabilidad, reflejando las áreas más susceptibles a los impactos ambientales. De esta forma, se buscó simplificar y estandarizar los datos, categorizando cada zona de acuerdo a su grado de vulnerabilidad, lo cual facilita su posterior análisis y la toma de decisiones.

Análisis de Pendiente

Figura 20
Mapa de pendiente reclasificada



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 21 se muestra la reclasificación de las cinco categorías en:

Figura 21
Reclasificación valores pendiente.

Color	Upper value	Label
■	≤ 1.0	Area Pendiente Muy Baja
■	≤ 2.0	Area Pendiente Moderadamente Baja
■	≤ 3.0	Area Pendiente Media
■	≤ 4.0	Area Pendiente Moderadamente Alta
■	≤ 5.0	Area Pendiente Alta

Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Tabla 15*Descripción de los valores de pendiente reclasificados*

Color	Valores	Clasificación	Descripción
Rojo	≤ 12.96	Área Pendiente Muy Baja	Zonas de menor pendiente y mayor accesibilidad humana. Estas áreas son altamente vulnerables debido al Fácil acceso para actividades turísticas y tránsito vehicular; Compactación del suelo y riesgo de alteraciones al hábitat de los frailejones; Mayor riesgo de acumulación de residuos sólidos y fragmentación del ecosistema.
Naranja	12.96 - 18.46	Área Pendiente Moderadamente Baja	Áreas con pendiente moderadamente baja. Estas zonas son también vulnerables, pero con menor impacto que las zonas rojas. Son accesibles para humanos, pero la inclinación puede limitar ciertas actividades. Impacto humano presente, aunque menor al de las zonas planas.
Amarillo	18.46 - 24.55	Área Pendiente Media	Áreas de pendiente intermedia. Representan una vulnerabilidad moderada. Se encuentran en un balance: accesibles para algunas actividades humanas, pero menos impactadas debido a la mayor dificultad de acceso. Pueden ser zonas de transición entre áreas altamente vulnerables y zonas más protegidas.
Verde Claro	24.55 - 30.84	Área Pendiente Moderadamente alta	Zonas con pendientes altas. Estas áreas son menos vulnerables debido a: Acceso humano limitado por la dificultad del terreno. Protección natural contra impactos directos como pisoteo o alteración del hábitat. Frailejones probablemente mejor conservados en estas zonas.

Verde Oscuro	30.84 - 50.09	Área Pendiente Alta	Zonas de mayor pendiente y baja vulnerabilidad. Estas áreas actúan como barreras naturales debido a: Muy difícil acceso humano, casi inexistente. Conservación óptima del hábitat de los frailejones. Bajo riesgo de alteración directa o indirecta por actividades humanas.
--------------	---------------	---------------------	--

En la Tabla 15 se puede observar la reclasificación de las áreas según sus valores de pendiente, la cual está acompañada de una descripción detallada de las características y vulnerabilidad asociadas a cada rango. Esta reclasificación permite identificar la accesibilidad humana, el riesgo de alteración del hábitat de los frailejones y la protección natural que ofrecen las diferentes pendientes del terreno. Los valores de pendiente están representados por colores que indican el nivel de vulnerabilidad, desde las áreas de pendiente baja, más susceptibles a la intervención humana, hasta las zonas de pendiente alta, donde el acceso y la alteración por actividades humanas son mínimos.

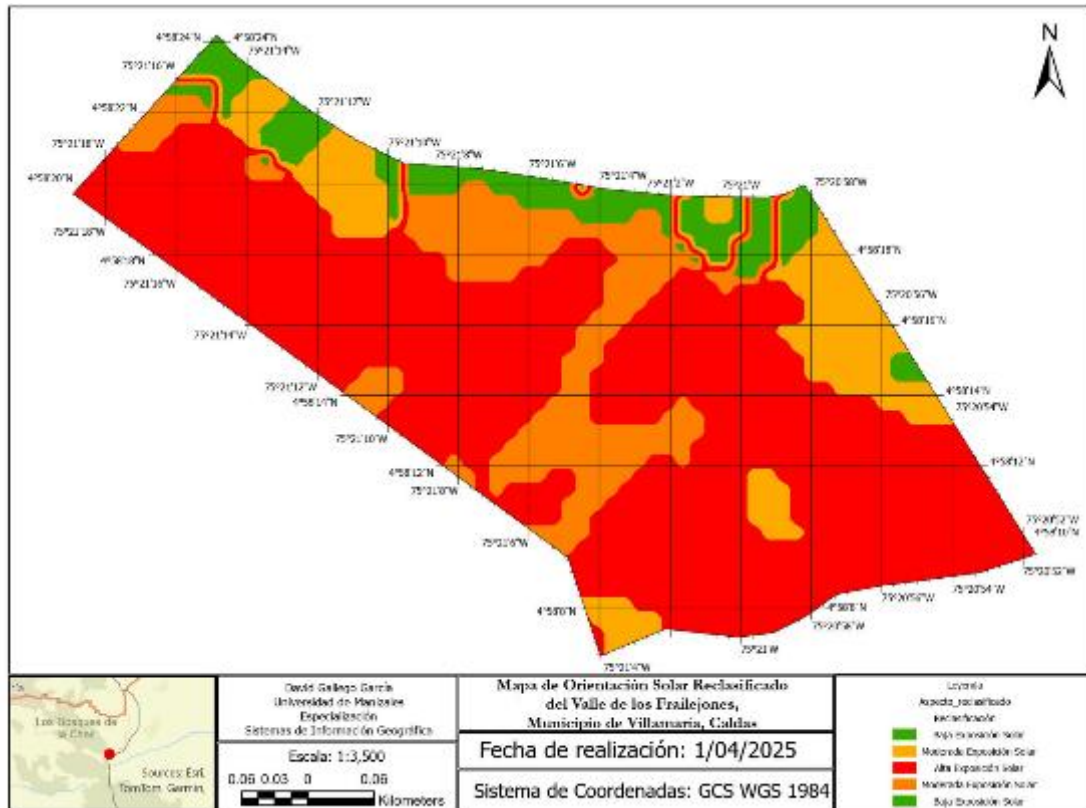
Las áreas con pendientes altas (representadas en verde) son aquellas que presentan inclinaciones elevadas, generalmente superiores a los 45° y hasta 90°. Estas zonas suelen ser de difícil acceso para las personas, lo que limita la realización de actividades turísticas y el paso frecuente de visitantes. Esta dificultad natural para acceder a las áreas de pendiente alta proporciona una protección significativa para los frailejones, ya que reduce considerablemente los impactos directos que podrían sufrir, tales como el pisoteo, la compactación del suelo o la acumulación de residuos generados por los turistas. Además, la escasa intervención humana en estas áreas facilita la conservación de su hábitat y asegura que los frailejones puedan desarrollarse en condiciones más óptimas. Por lo tanto, asignar un color verde (que indica bajo riesgo) a estas zonas tiene pleno sentido, ya que sus características geográficas actúan como una barrera natural que impide las alteraciones causadas por la actividad humana.

En contraste, las pendientes bajas (representadas en rojo) corresponden a áreas planas o con ligera inclinación (generalmente menores o iguales a 1.72°), las cuales son mucho más accesibles

para las personas. Esta facilidad de acceso provoca que estas zonas sean altamente vulnerables a las actividades humanas, como el turismo, el tránsito vehicular o las prácticas recreativas. Las áreas con pendientes bajas presentan un mayor riesgo para los frailejones debido a varios factores. En primer lugar, la compactación del suelo es más frecuente en estas áreas, lo que afecta la capacidad del terreno para absorber agua y favorece la erosión. Además, las alteraciones al hábitat pueden ocurrir con mayor facilidad, ya que las actividades recreativas y turísticas afectan la flora y la fauna local. La acumulación de residuos sólidos también se convierte en un problema crítico en estas zonas, dado que la mayor presencia humana aumenta la probabilidad de desechos que pueden deteriorar aún más el ecosistema. Representar estas zonas con color rojo (que indica alto riesgo) subraya la relación directa entre la alta accesibilidad humana y la vulnerabilidad de los frailejones, resaltando la necesidad de tomar medidas de protección más estrictas en estos entornos.

Análisis de Exposición Solar

Figura 22
Mapa de orientación solar Reclasificado.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 23 se muestra la reclasificación de las cinco categorías en:

Figura 23
Reclasificación valores aspecto

Color	Upper value	Label
	≤ 1.0	Baja Exposición Solar
	≤ 2.0	Moderada Exposición Solar
	≤ 3.0	Alta Exposición Solar
	≤ 4.0	Moderada Exposición Solar
	≤ 5.0	Baja Exposición Solar

Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Tabla 16*Descripción de los valores de aspecto reclasificados.*

Color	Valores	Clasificación	Descripción
Verde Oscuro	0°-45°	Baja exposición solar	Las áreas ubicadas en esta dirección reciben menos radiación solar directa, por lo que tienden a ser más frías y con mayor humedad.
Naranja	45°-135°	Moderada exposición solar	Estas áreas reciben una cantidad intermedia de radiación solar. La temperatura es más templada en comparación con las áreas del norte y sur, favoreciendo una vegetación moderada.
Rojo	135°-225°	Alta exposición solar	Las áreas que se orientan hacia el sur reciben una mayor cantidad de radiación solar directa, lo que las hace más cálidas. Estas zonas tienden a ser más secas y más vulnerables especialmente en los ecosistemas de páramo.
Naranja	225°-315°	Moderada exposición solar	Estas áreas también tienen una exposición solar intermedia, similar a las zonas del noreste y sureste, lo que permite la existencia de vegetación moderada y un equilibrio térmico en el terreno.
Verde Oscuro	315°-360°	Baja exposición solar	Estas áreas, al igual que las áreas con orientación norte, reciben una baja cantidad de radiación solar, lo que las mantiene más frías y húmedas, siendo propensas a una mayor conservación de la vegetación y las condiciones naturales del ecosistema.

En la Tabla 16 se muestra la clasificación y descripción de los valores de aspecto asignados en el análisis. Esta tabla detalla las categorías de exposición solar y los valores de aspecto en función de las direcciones cardinales del terreno, permitiendo identificar las áreas con alta, moderada o baja exposición solar, lo cual es crucial para entender cómo las condiciones climáticas influyen en la distribución de la vegetación y la conservación del ecosistema de páramo.

Implicaciones para el Turismo en el Páramo

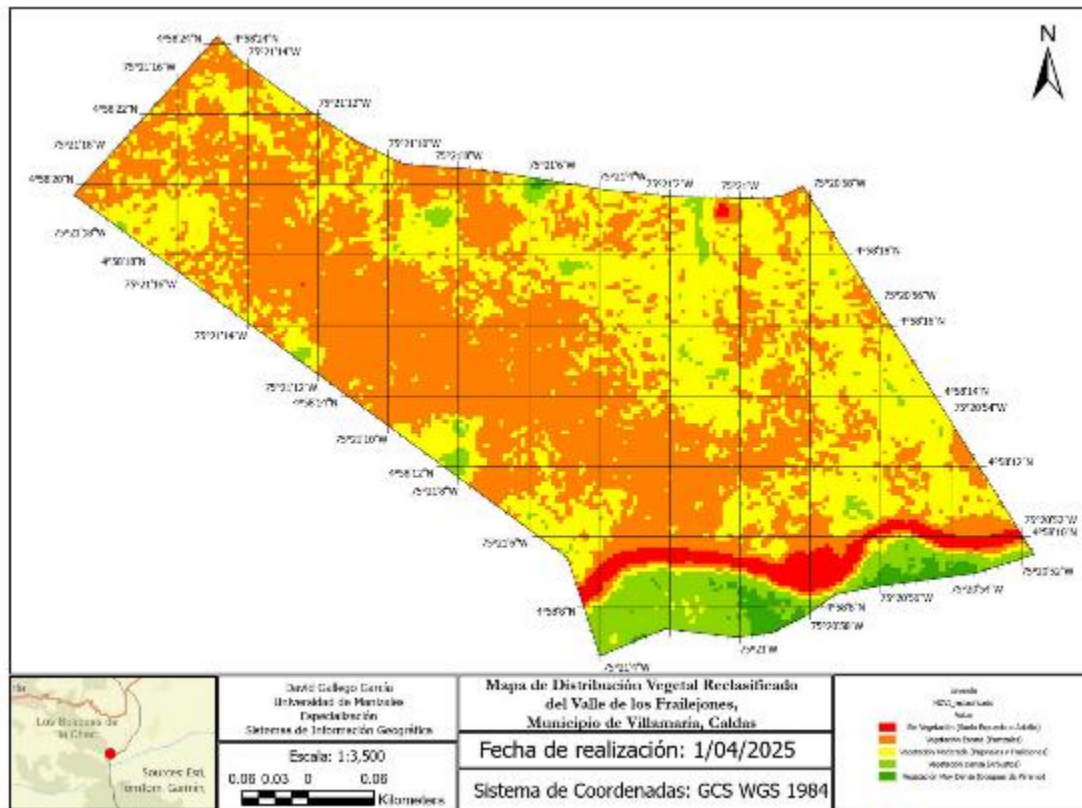
Zonas de alta exposición solar (rojo): Dado su mayor atractivo para los turistas, estas áreas deben gestionarse cuidadosamente para evitar impactos negativos, como la erosión del suelo, la desecación y la alteración de la vegetación. Se deben implementar políticas de gestión del turismo sostenible, que incluyan la delimitación de áreas de acceso y el monitoreo de las actividades turísticas.

Zonas de moderada exposición solar (naranja): Estas zonas, al ser puntos de transición, deben considerarse para el ecoturismo sostenible. Su acceso debe ser controlado para evitar la sobreexplotación, pero también pueden ser utilizadas como corredores ecológicos para el turismo de naturaleza. El monitoreo constante es clave para mantener el equilibrio ecológico.

Zonas de baja exposición solar (verde): Aunque estas áreas tienen menos atractivo para el turismo masivo, son fundamentales para la conservación. Se debe garantizar que reciban protección especial frente a las actividades humanas, utilizando estas zonas para el turismo de bajo impacto, como el turismo de observación y el ecoturismo educativo, con un enfoque en la conservación y la sensibilización ambiental.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)






Figura 24
Mapa de Distribución Vegetal reclasificada.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 25 se muestra la reclasificación de las cinco categorías en:

Figura 25
Reclasificación NDVI.

Color	Upper value	Label
	≤ 1.0	Sin Vegetación (Suelo Expuesto o Asfalto)
	≤ 2.0	Vegetación Escasa (Pastizales)
	≤ 3.0	Vegetación Moderada (Pajonales y Frailejones)
	≤ 4.0	Vegetación Densa (Arbustos)
	≤ 5.0	Vegetación Muy Densa (Bosques de Páramo)

Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Tabla 17
Descripción de los valores de NDVI reclasificados.

Color	Valores	Clasificación	Descripción
Rojo	≤ 1.0	Sin Vegetación (Suelos Expuestos o Asfalto)	Las áreas representadas en rojo en el mapa indican zonas sin vegetación , lo que corresponde a suelos expuestos o superficies impermeables como el asfalto . Estas zonas están principalmente ubicadas en las áreas bajas o en las zonas de intervención humana como caminos o infraestructuras, lo que refleja la ausencia de vegetación debido a la alteración del suelo. En el contexto del valle, estas áreas son importantes ya que representan los puntos de alta vulnerabilidad donde las actividades humanas pueden generar una alteración del hábitat .

<p>Naranja</p>	<p>≤ 2.0</p>	<p>Vegetación Escasa (Pastizales)</p>	<p>Las zonas de vegetación escasa, representadas en naranja, corresponden a áreas con pastizales o suelos donde la vegetación es tenue y poco densa. En el contexto de páramos como el Valle de los Frailejones, estas áreas de vegetación escasa pueden estar relacionadas con condiciones de sequedad o baja humedad, lo que limita el crecimiento de especies más diversas o especializadas como los frailejones.</p>
<p>Amarillo</p>	<p>≤ 3.0</p>	<p>Vegetación Moderada (Pajonales y Frailejones)</p>	<p>Las zonas en amarillo muestran vegetación moderada, que incluye áreas con pajonales y frailejones. Estas zonas son ecológicamente las más importantes dentro del valle para la conservación del ecosistema de páramo, ya que los frailejones son una especie emblemática de estos ecosistemas, desempeñando un rol crucial en la regulación del ciclo del agua. En este caso, el NDVI moderado refleja un equilibrio entre la vegetación y las condiciones del suelo, lo que sugiere un hábitat saludable pero posiblemente en transición o afectado por factores ambientales o humanos.</p>

Verde Claro	≤ 4.0	Vegetación Densa (Arbustos)	Las zonas en verde claro indican áreas de vegetación densa , que están dominadas por arbustos y otras especies de vegetación más desarrollada. Estas zonas representan hábitats más saludables, con un desarrollo vegetal más robusto y en buena condición. La densidad de vegetación en estas áreas favorece la conservación de la biodiversidad del páramo, actuando como refugio para una gran variedad de especies vegetales y animales.
Verde Oscuro	≤ 5.0	Vegetación Muy Densa (Bosques de Páramo)	Las zonas en verde oscuro representan las áreas con vegetación muy densa , específicamente bosques de páramo . Los bosques de páramo actúan como reservorios de carbono y son fundamentales para la conservación del agua y la biodiversidad . Estas zonas están generalmente mejor protegidas debido a su ubicación en áreas más elevadas y de difícil acceso, lo que limita la intervención humana.

En la Tabla 17 se ha clasificado la vegetación en el Valle de los Frailejones según los valores obtenidos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Esta tabla proporciona una segmentación de las áreas según su densidad de vegetación, para identificar de manera precisa las zonas con mayor o menor cobertura vegetal.

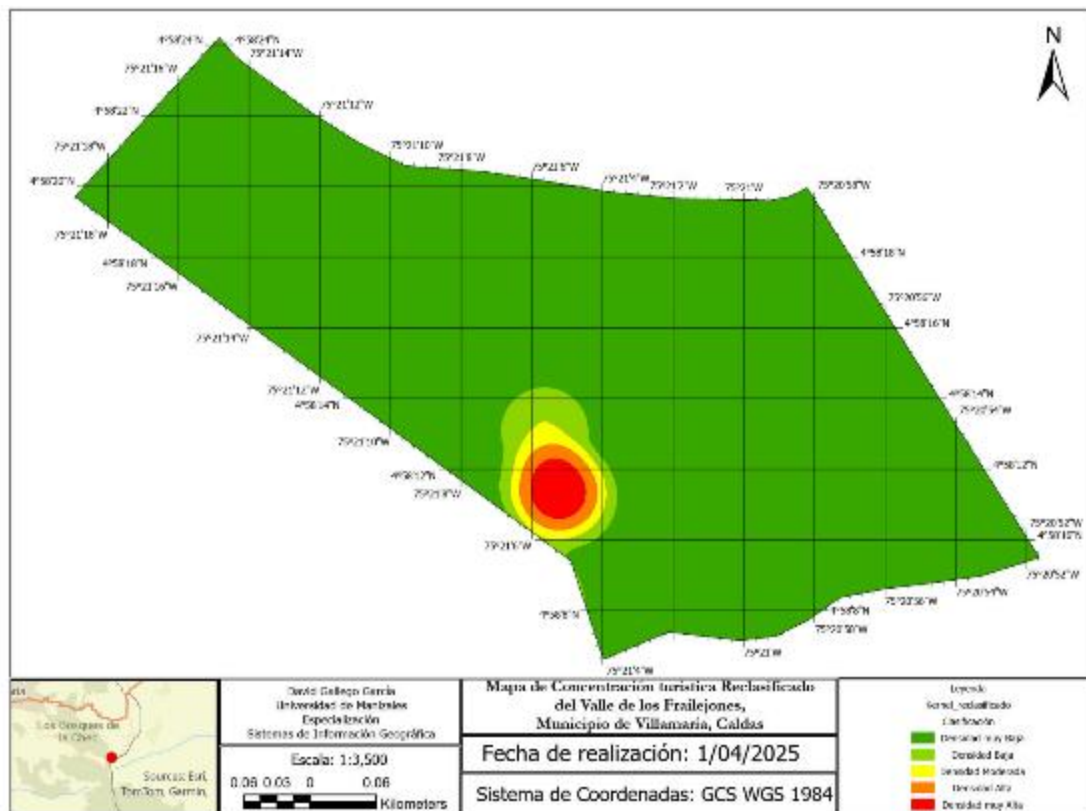
Cada categoría reflejada en la tabla corresponde a una clase de vegetación con características específicas, desde las áreas sin vegetación, como suelos expuestos o asfaltados, hasta las áreas con vegetación muy densa, como los bosques de páramo. Esta clasificación es fundamental para evaluar la salud y la distribución de la vegetación en el valle, y proporciona una base sólida para futuras decisiones de manejo del territorio y conservación del ecosistema.

Análisis de Densidad Kernel

El análisis de densidad Kernel es una herramienta espacial se utilizó para estimar la concentración del fenómeno concentración turística en el territorio, en este caso en el Valle de los Frailejones. Para ello, se utilizaron los puntos de observación turística recolectados en campo, representando lugares donde se evidencio el tránsito de los visitantes.

Este análisis genero una superficie continua que refleja la densidad de las ocurrencias, suavizando los valores mediante un núcleo (kernel) alrededor de cada punto. A partir del resultado, se obtuvo un mapa de calor que muestra zonas con diferente nivel de presión turística. Posteriormente, este resultado fue reclasificado y se obtuvo este mapa.

Figura 26
Mapa de Concentración turística Reclasificada.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

En la figura 27 se muestra la reclasificación de las cinco categorías en:

Figura 27
Reclasificación Densidad Kernel.

Color	Upper value	Label
	≤ 1.0	Densidad muy Baja
	≤ 2.0	Densidad Baja
	≤ 3.0	Densidad Moderada
	≤ 4.0	Densidad Alta
	≤ 5.0	Densidad muy Alta

Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Tabla 18
Descripción de los valores de Densidad Kernel reclasificados

Color	Valores	Clasificación	Descripción
Verde Oscuro	≤ 1.0	Densidad muy Baja	Este valor representa las zonas con una densidad muy baja de turistas, donde la concentración de visitantes es casi inexistente. Estas áreas son probablemente las más alejadas de los puntos de acceso turístico o aquellas que no han sido descubiertas por los turistas. El impacto ambiental en estas zonas es mínimo debido a la baja presencia humana.

Verde Claro	≤ 2.0	Densidad Baja	En este caso, se trata de zonas con una densidad baja de turistas, lo que implica que hay una presencia de visitantes, pero no en cantidades que alteren significativamente el ecosistema. El impacto ambiental sigue siendo bajo, pero las áreas comienzan a recibir algo de presión humana, lo que puede afectar gradualmente el entorno natural si no se gestionan adecuadamente
Amarillo	≤ 3.0	Densidad Moderada	Las áreas con densidad moderada de turistas son aquellas que tienen una presencia más notable de visitantes. En estas zonas, el impacto humano comienza a ser más visible, con posibles alteraciones en la vegetación, el suelo y otras características ecológicas. Es esencial implementar medidas de manejo en estas áreas para evitar que el impacto se convierta en algo negativo.
Naranja	≤ 4.0	Densidad Alta	Las zonas con alta densidad de turistas son áreas con una presencia significativa de visitantes, lo que genera un impacto considerable sobre el ecosistema. Las actividades humanas, como el camping, senderismo y la generación de residuos, se vuelven más frecuentes en estas áreas, lo que puede llevar a una degradación ambiental si no se controlan adecuadamente.

Rojo	≤ 5.0	Densidad muy Alta	<p>Este valor indica las zonas con la mayor concentración de turistas. El impacto ambiental en estas áreas es crítico, ya que la cantidad de visitantes supera la capacidad de carga del ecosistema, lo que provoca una presión significativa sobre los recursos naturales. Estas zonas requieren una intervención urgente para mitigar los efectos negativos del turismo, como la regulación de la cantidad de visitantes y la creación de infraestructuras sostenibles</p>
------	------------	-------------------	--

La Tabla 18 presenta una clasificación de las zonas de acuerdo con la densidad turística en el Valle de los Frailejones, utilizando una escala de 1 a 5 para recategorizar las áreas según la concentración de visitantes. Este análisis es para identificar las zonas con mayor riesgo de impacto ambiental debido al turismo, permitiendo priorizar la gestión y conservación de las áreas más sensibles.

7.2.2 Integración de Capas

La integración de capas para generar el mapa de vulnerabilidad fue un proceso que involucró el uso de diversas herramientas en ArcGIS Pro. Primero, se realizaron varios análisis espaciales que generaron mapas base para diferentes factores clave, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), la pendiente, la exposición solar y la densidad Kernel. Estos mapas reflejaron diversas características del terreno, como la cantidad de vegetación, la orientación solar, la inclinación del terreno y la concentración de actividad humana en la zona, respectivamente.

Una vez obtenidos los mapas base, se procede a la reclasificación de cada uno de ellos utilizando la herramienta Reclasificación en ArcGIS Pro para asignar valores a las diferentes

categorías dentro de cada mapa, con el objetivo de simplificar y estandarizar los datos. Los valores de cada clase fueron asignados en una escala de 1 a 5, donde 1 representaba las condiciones más favorables (baja vulnerabilidad) y 5 representaba las condiciones más desfavorables (alta vulnerabilidad). Por ejemplo, en el caso del NDVI, las zonas sin vegetación fueron asignadas con el valor 1, mientras que las áreas con vegetación muy densa recibieron el valor 5. Lo mismo se aplicó a las capas de pendiente, exposición y densidad kernel, donde cada clase de las capas fue asignada a un valor correspondiente dentro de la misma escala.

Con los mapas ya reclasificados, el siguiente paso fue la asignación de pesos a cada capa, para determinar la influencia relativa de cada factor en la vulnerabilidad del ecosistema. Para ello, se utilizó la herramienta Álgebra de Mapas (Calculadora Ráster), que permitió aplicar una fórmula ponderada a cada capa, de acuerdo con su peso específico.

Luego de asignar los pesos a las capas reclasificadas, se utilizó Calculadora Ráster para combinar todas las capas de acuerdo con la fórmula ponderada. El cálculo final de la vulnerabilidad se llevó a cabo al multiplicar los valores de cada capa reclasificada por su respectivo peso y luego sumarlos. La fórmula resultante fue:

$$\text{Vulnerabilidad Final} = (\text{NDVI_reclasificado} \times 0.2) + (\text{Aspecto_reclasificado} \times 0.2) \\ + (\text{Pendiente_reclasificada} \times 0.2) + (\text{Kernel_reclasificado} \times 0.4)$$

Se decidió utilizar estos pesos específicos en el análisis de vulnerabilidad porque reflejan de manera adecuada la influencia relativa de cada factor en la vulnerabilidad del ecosistema en el Valle de los Frailejones. A continuación, se explica por qué se asignaron estos pesos a cada capa:

NDVI:

El NDVI mide la salud de la vegetación y la cantidad de vegetación en el área, lo cual es crucial para entender la capacidad del ecosistema para regular el ciclo del agua, el carbono y ofrecer hábitat a diversas especies. Sin embargo, aunque la vegetación es un factor relevante, no es el único que determina la vulnerabilidad. La vegetación puede ser densa en algunas áreas, pero otros factores como la actividad humana o las condiciones del terreno también juegan un papel

importante. Por lo tanto, se asignó un peso de 0.2, ya que la vegetación influye en la vulnerabilidad, pero no de manera predominante en comparación con otros factores.

Aspecto:

El aspecto indica la orientación de las pendientes, lo cual tiene un impacto directo sobre las condiciones micro climáticas, especialmente la exposición solar. Las zonas orientadas al sur suelen estar más expuestas al sol, lo que puede aumentar el riesgo de erosión y desecación del suelo. Sin embargo, este factor también tiene una importancia moderada, ya que la pendiente o la actividad humana pueden ser igualmente influyentes en la vulnerabilidad. Por esta razón, se asignó un peso de 0.2, reflejando su importancia, pero sin sobrevalorar su efecto sobre la vulnerabilidad en comparación con otros factores.

Pendiente:

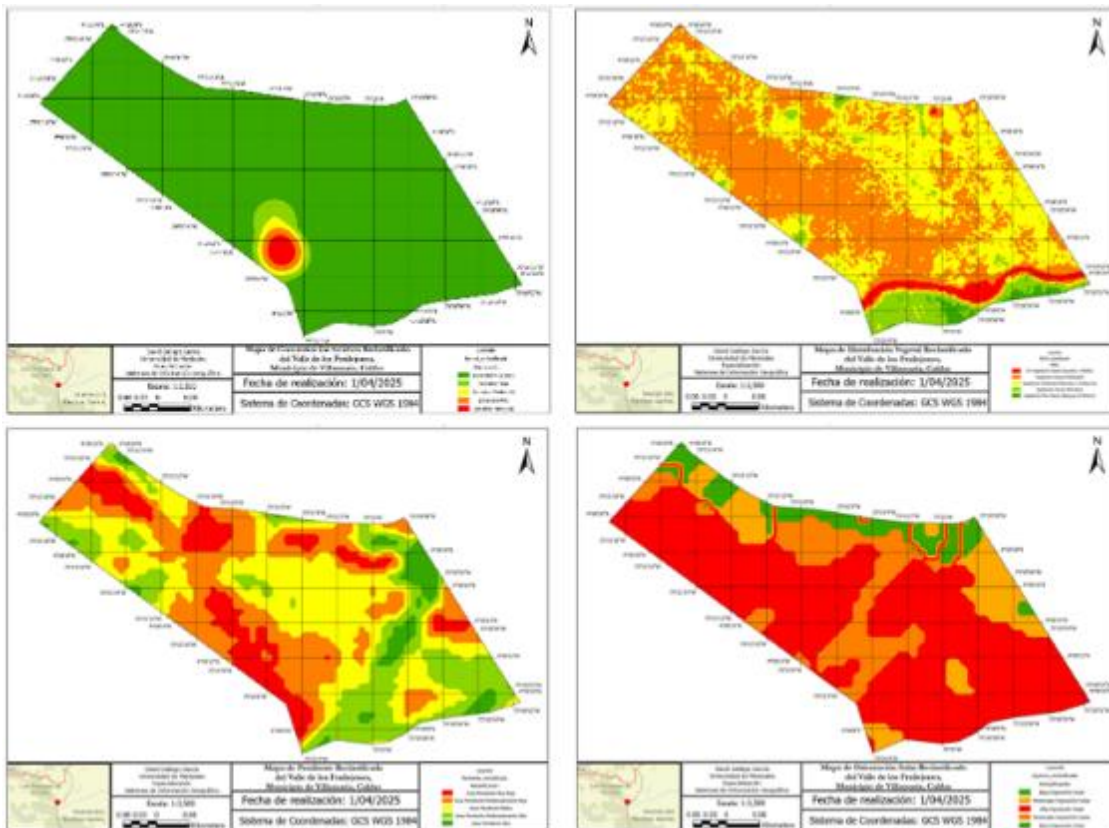
La pendiente del terreno es un factor clave para determinar la estabilidad del suelo, la accesibilidad y la susceptibilidad a la erosión. Las zonas con pendientes bajas son más susceptibles a la compactación del suelo y a las actividades humanas, como el pastoreo o el turismo. Las áreas con pendientes altas, por otro lado, son más difíciles de acceder y tienden a estar menos alteradas. Si bien la pendiente es importante, se asignó un peso de 0.2 porque es solo uno de los muchos factores que afectan la vulnerabilidad en el ecosistema, y la interacción con otros factores, como la exposición solar o la densidad turística, también es crucial.

Densidad Kernel :

Finalmente, la densidad kernel, que mide la concentración de actividades humanas, se asignó con el peso más alto, 0.4. Este factor es el más determinante en el análisis de vulnerabilidad porque las actividades humanas, como el turismo, pueden generar un impacto significativo sobre el ecosistema. Las zonas de alta concentración de visitantes son más susceptibles a la alteración del hábitat, contaminación y erosión del suelo. El impacto del turismo en el medio ambiente incluye efectos como la erosión del suelo, el aumento de la contaminación, los vertidos al mar, la pérdida de hábitats naturales, el aumento de la presión sobre las especies en peligro de extinción y una mayor vulnerabilidad a los incendios forestales (Ecotourism World, 2023). Estos efectos resaltan cómo las actividades turísticas pueden intensificar la vulnerabilidad de los ecosistemas,

especialmente en áreas con alta afluencia de turistas, lo que hace necesario un manejo adecuado para mitigar estos impactos. Además, las áreas más accesibles, que suelen coincidir con zonas de alta densidad turística, pueden experimentar una mayor presión, lo que hace que este factor sea clave para determinar la vulnerabilidad del ecosistema.

Figura 28
Mapas Reclasificados



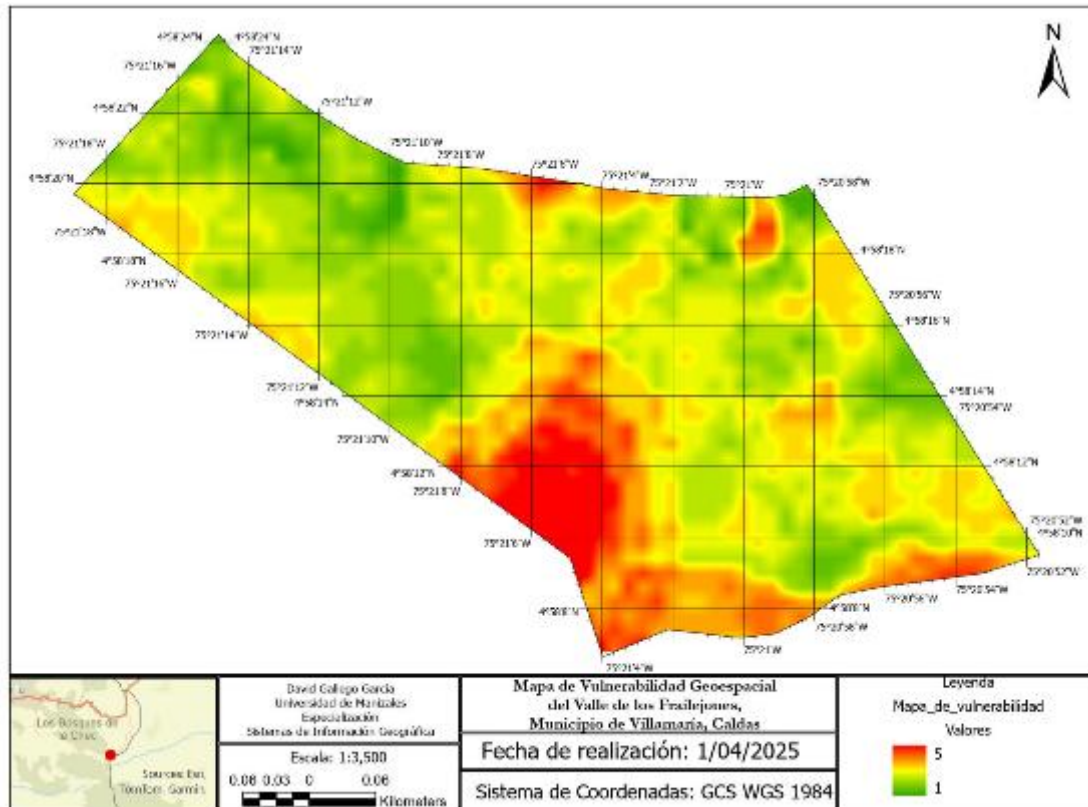
Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

7.2.3 Obtención mapa de vulnerabilidad

El producto final es un mapa de vulnerabilidad (Figura 29.), con valores que se encuentran en una escala de 1 a 5, donde las áreas con valores cercanos a 1 representan zonas de baja vulnerabilidad y las áreas con valores cercanos a 5 indican zonas de alta vulnerabilidad. La integración de las capas y la asignación de pesos permitieron generar un mapa que visualiza la

interacción de los factores evaluados, lo que facilita la identificación de las áreas más críticas dentro del valle.

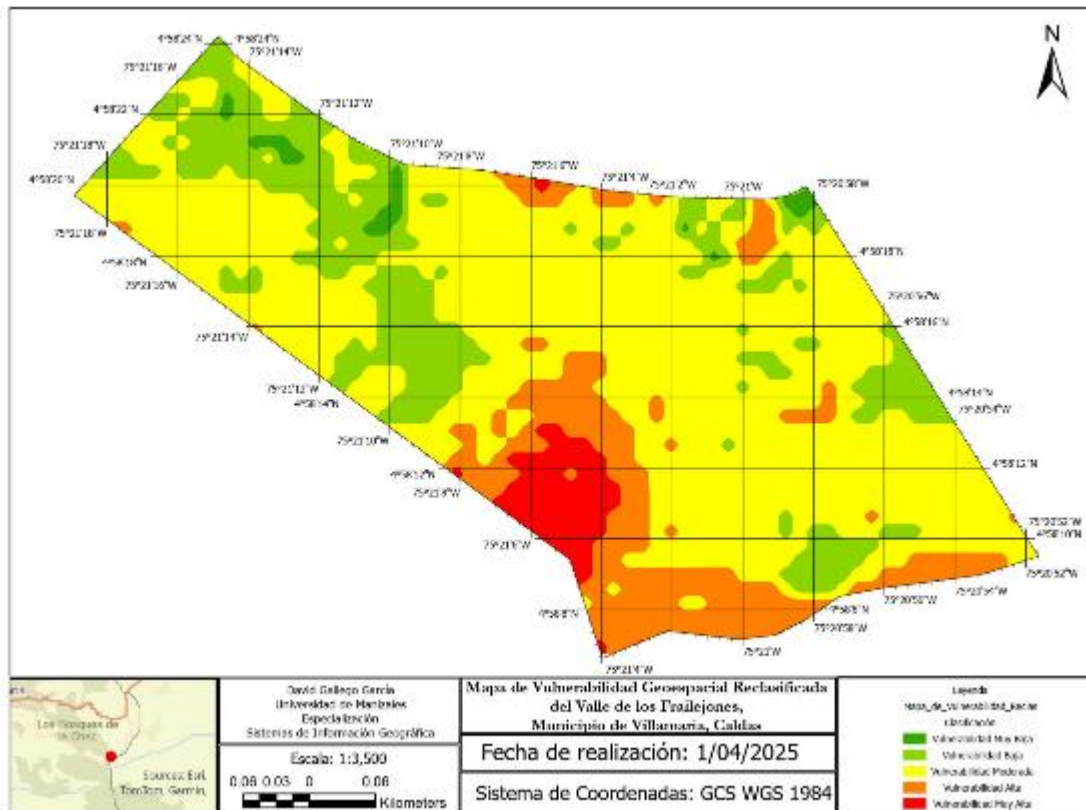
Figura 29
Mapa de Vulnerabilidad



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Con el fin de darle claridad a los valores de vulnerabilidad, al mapa se le realiza una reclasificación de 1 a 5 con valores para representar la vulnerabilidad. (Figura 30.)

Figura 30
Mapa de Vulnerabilidad Reclasificado



Fuente: Propia (ArcGIS)

Tabla 19
Descripción de los valores de Vulnerabilidad reclasificados

Color	Valores	Clasificación	Descripción
-------	---------	---------------	-------------

Verde Oscuro	≤ 1.0	Vulnerabilidad Muy Baja	Zonas con características naturales favorables, como alta pendiente, alta densidad de vegetación (NDVI alto), y baja exposición solar. Estas áreas tienen un riesgo mínimo de alteración al ser áreas muy alejadas de los puntos turísticos. El impacto ambiental es bajo debido a la baja presencia humana.
Verde Claro	≤ 2.0	Vulnerabilidad Baja	Áreas con pendiente moderadamente alta, buena cobertura vegetal, y exposición solar limitada. Pueden ser sensibles a procesos de erosión si no se gestionan adecuadamente. Son zonas con baja densidad de turistas y un impacto ambiental bajo, aunque hay una ligera presión sobre el ecosistema.

<p>Amarillo</p>	<p>≤ 3.0</p>	<p>Vulnerabilidad Moderada</p>	<p>Zonas con una combinación de pendiente moderada y exposición solar mayor, junto con vegetación moderada. Estas áreas están más expuestas a alteraciones por procesos naturales y antrópicos, por lo que pueden requerir intervención para evitar la pérdida de vegetación y su biodiversidad. Son zonas con presencia moderada de turistas, lo que empieza a generar alteraciones visibles en la vegetación, el suelo y otras características ecológicas.</p>
<p>Naranja</p>	<p>≤ 4.0</p>	<p>Vulnerabilidad Alta</p>	<p>Áreas con pendiente baja, baja cobertura vegetal (NDVI bajo) y alta exposición solar, debido a esto la vulnerabilidad es considerable con efectos potenciales negativos de erosión del suelo, pérdida de hábitats, y la alteración de la biodiversidad. En estas áreas hay alta concentración de turistas, y el impacto ambiental comienza a ser considerable.</p>

Rojo	≤ 5.0	Vulnerabilidad Muy Alta	<p>Áreas con una combinación crítica de pendiente muy baja, exposición solar extrema y baja densidad de vegetación. Estas zonas son muy susceptibles a procesos de erosión severa, pérdida de hábitats y la alteración de la estructura ecológica debido a la presión ambiental. Estas zonas son las que presentan la mayor concentración de turistas registrada, donde los impactos ambientales son críticos y visibles. La presión sobre los recursos naturales es alta, y es necesaria una intervención urgente.</p>
------	------------	-------------------------	---

La Tabla 19 presenta la descripción de los valores de vulnerabilidad reclasificados, los cuales fueron asignados a las diversas áreas dentro del Valle de los Frailejones. Estos valores se derivaron a partir de un análisis detallado que consideró las variables geoespaciales escogidas, como la pendiente, la exposición solar, el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el análisis de densidad Kernel. Cada una de estas variables jugando un papel fundamental en la determinación de la vulnerabilidad del ecosistema ante las presiones humanas y los factores ambientales.

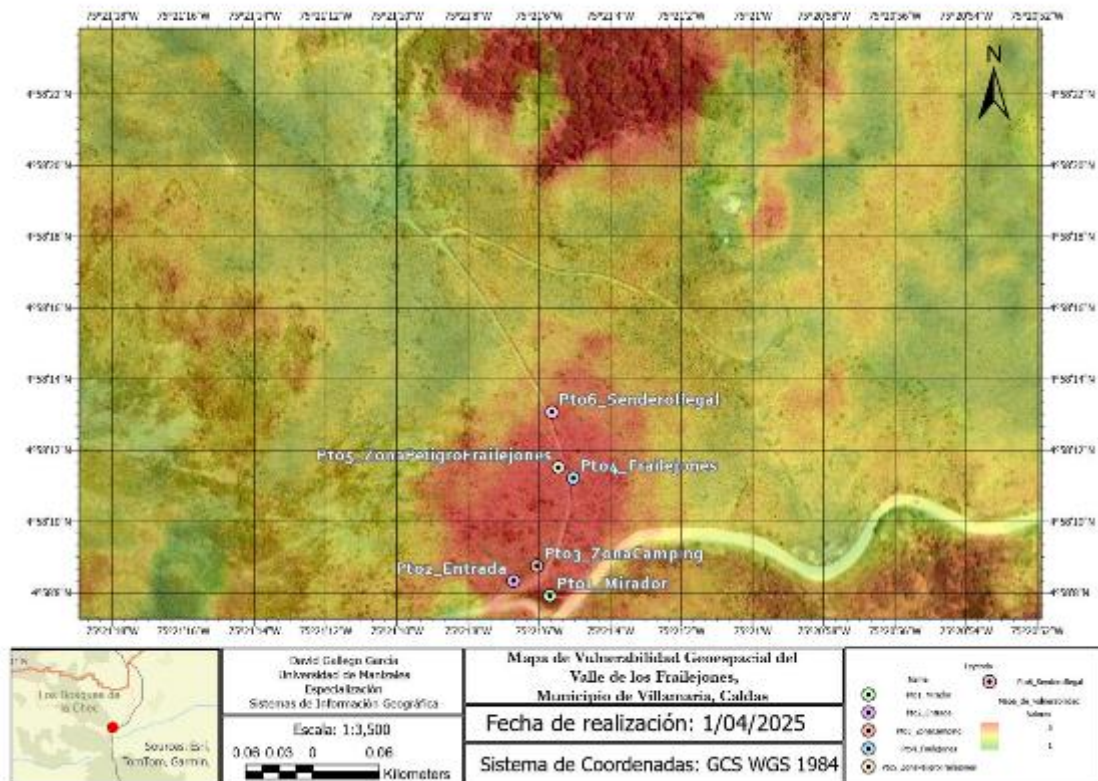
El proceso de reclasificación permitió categorizar las áreas del valle de acuerdo con los niveles de vulnerabilidad que presentan, para facilitar la interpretación de los riesgos a los que está

expuesto el ecosistema. Al reclasificar los valores, se logró una segmentación del territorio en distintas zonas de acuerdo con su susceptibilidad a sufrir alteraciones.

La asignación de estos valores de vulnerabilidad, está basada en un análisis, que ayuda a identificar con exactitud las áreas más sensibles dentro del valle. Esta información es crucial para la planificación de actividades de conservación y gestión ambiental, ya que permite priorizar las zonas que requieren atención urgente y aquellas que, si se gestionan adecuadamente, podrían mantener su estabilidad ecológica.

Identificación Zonas más vulnerables.

Figura 31
Mapa de Vulnerabilidad Final



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Finalmente, luego de realizar los mapas base, la integración de capas y la obtención del mapa de vulnerabilidad geoespacial, se procede a analizar el mapa obtenido, el cual se superpone

con una imagen satelital de la zona de estudio. Este análisis tiene como objetivo identificar las áreas más vulnerables del ecosistema, considerando los factores ambientales y humanos que inciden en su salud y estabilidad.

En el mapa final, se observan las áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad, clasificados en rangos. (Tabla 17). Las zonas con mayor vulnerabilidad están delimitadas, lo que permite identificar puntos críticos donde los efectos del turismo y otras actividades humanas pueden tener un impacto significativo.

Los puntos 6 de observación marcados en el mapa, son de particular interés, ya que corresponden a las áreas donde se registró la concentración de actividades turísticas. La superposición del mapa de vulnerabilidad con la imagen satelital permite visualizar la relación entre las áreas de alta vulnerabilidad y los puntos críticos de concentración turística.

El análisis visual confirma que las zonas con mayor vulnerabilidad coinciden con áreas de alta densidad turística, lo que pone de manifiesto la conexión directa entre la presencia humana y el deterioro ambiental. Además, se puede observar que algunas de las áreas más vulnerables se encuentran cerca de los puntos de acceso, lo que refuerza la necesidad de una regulación más estricta en estas áreas.

Este mapa final proporciona una herramienta clave para la gestión ambiental en el Valle de los Frailejones, ya que facilita la identificación de las zonas más críticas y permite enfocar los esfuerzos de conservación en áreas donde los impactos son más severos.

7.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo

La implementación de estrategias efectivas para disminuir la vulnerabilidad del ecosistema del Valle de los Frailejones ante los impactos generados por el turismo es crucial para garantizar la conservación del área a largo plazo. Estas estrategias deben centrarse en la gestión adecuada del turismo, la educación ambiental y la restauración ecológica. A continuación, se presentan varias

propuestas clave para mitigar los efectos negativos del turismo y reducir la vulnerabilidad del ecosistema:

Regulación de la Capacidad de Carga Turística

Una de las estrategias principales para reducir la vulnerabilidad del Valle es regular el número de turistas que pueden acceder a las zonas más sensibles del ecosistema. La sobrecarga de turistas en áreas ecológicamente frágiles genera una presión excesiva sobre los recursos naturales, lo que aumenta los impactos como la erosión del suelo, la perturbación de la flora y fauna, y la contaminación. Para ello, se debe establecer un límite en el acceso diario de los visitantes en la zona, como las áreas cercanas a los frailejones.

Delimitación y Señalización de Senderos Autorizados

El senderismo ilegal y la alteración de la vegetación debido al tránsito fuera de los caminos establecidos es una de las actividades más perjudiciales para el ecosistema. Para mitigar este impacto, se propone la creación de senderos delimitados y señalizados en áreas de alta afluencia turística. Los senderos deben ser diseñados de manera que minimicen la perturbación a la flora y fauna, especialmente a los frailejones. Además, se debe informar sobre la importancia de estos ecosistemas para la biodiversidad y el ciclo hidrológico. El mantenimiento regular de los senderos debe ser constante para evitar la erosión y la pérdida de cobertura vegetal, y para garantizar que los turistas se mantengan en las rutas establecidas

Campañas de Sensibilización y Educación Ambiental

Para reducir los impactos del turismo, es fundamental fomentar la educación ambiental tanto entre los turistas como entre los operadores turísticos. Esto se puede lograr a través de campañas de sensibilización que informen sobre los impactos negativos de las prácticas irresponsables, como la generación de residuos y el camping ilegal, e inciten a la adopción de prácticas responsables durante la visita. Adicional la generación de material educativo, tanto impreso como digital, que se entregue a los turistas al ingresar a las zonas protegidas, informándoles sobre la flora y fauna locales, los peligros del turismo irresponsable y las regulaciones vigentes. La capacitación de guías turísticos en el manejo adecuado del entorno

natural y en cómo educar a los turistas sobre la importancia de proteger los ecosistemas de páramo es primordial para fortalecer el proceso de sensibilización.

Fortalecimiento de la Participación Comunitaria en la Gestión del Turismo

La participación activa de las comunidades locales en la gestión del turismo es clave para garantizar que las estrategias de conservación sean efectivas a largo plazo. Las comunidades deben estar involucradas en la planificación y ejecución de las estrategias, así como en la vigilancia y monitoreo de las actividades turísticas. Esto no solo contribuye a la conservación, sino también al desarrollo sostenible de las comunidades locales. El desarrollo de proyectos sostenibles, gestionados por la comunidad, como tours educativos y programas de voluntariado ambiental permitirán que los visitantes se involucren en actividades de conservación y restauración

Restauración Ecológica de Zonas Afectadas

La restauración de áreas degradadas es una estrategia fundamental para recuperar las zonas que han sufrido impactos negativos debido al turismo. Esto incluye la rehabilitación de los suelos erosionados, la replantación de frailejones y otras especies nativas, y la restauración de los hábitats naturales. Así mismo promover proyectos de reforestación en las áreas más afectadas, utilizando especies nativas del ecosistema de páramo para garantizar la recuperación del paisaje y el hábitat de la fauna local. También es importante hacer control de especies invasoras como el retamo espinoso que pueden desplazar a la flora nativa, asegurando que las especies locales sean restauradas y protegidas

Monitoreo Continuo y Uso de Tecnología para Evaluar los Impactos

El monitoreo constante de las actividades turísticas es esencial para detectar problemas a tiempo y ajustar las estrategias de gestión según sea necesario. Utilizar tecnologías avanzadas, como drones, cámaras trampa y sensores remotos, permite realizar un seguimiento en tiempo real de los impactos del turismo sobre el ecosistema.

8. Discusión

8.1 Fase 1. Determinación de las principales acciones que pueden generar impactos ambientales asociados al turismo.

A través del trabajo de campo y la recopilación de información secundaria, se identificaron cinco acciones principales asociadas al turismo que generan impactos ambientales en las zonas de frailejones. Estas acciones incluyen el camping ilegal, el senderismo ilegal, la generación de residuos, la perturbación sonora y el vuelo de drones. Estas actividades, realizadas sin la debida regulación y en zonas no habilitadas para el turismo, desencadenan una serie de efectos negativos en los ecosistemas de páramo y en la biodiversidad local. A partir de la identificación de estas acciones, se evidenciaron diversos impactos ambientales asociados que afectan tanto a los recursos naturales como a la calidad del paisaje, la fauna, y las fuentes hídricas.

Una de las primeras consecuencias observadas de estas acciones es el impacto generado por la alta densidad turística. El camping ilegal y el senderismo no autorizado son actividades que contribuyen al aumento de la afluencia de turistas en áreas sin regulación. Cuando las personas ingresan a estas zonas sin restricciones, la capacidad de carga de los ecosistemas se ve superada. Este aumento de visitantes, sin control adecuado sobre el número de personas o las zonas habilitadas para tales actividades, provoca una sobrecarga del entorno natural. Según Martínez, L. (2020), el turismo, aunque se considera una actividad económica menos perjudicial en comparación con sectores como la minería o los hidrocarburos, tiene efectos tanto negativos como positivos, los cuales se están documentando en relación con las diferentes modalidades de turismo, incluido el turismo de naturaleza o ecoturismo. La alta densidad turística tiene repercusiones negativas sobre la conservación del paisaje y los recursos naturales, ya que interrumpe los ciclos ecológicos esenciales y deteriora la calidad del entorno. En este sentido, la densidad turística no solo deteriora la belleza del paisaje, sino que también amenaza a los ecosistemas frágiles, afectando la vegetación, los hábitats de fauna y la estabilidad del suelo.

El impacto a la biodiversidad es otro de los efectos clave asociados a estas acciones. Las actividades de camping y senderismo ilegal afectan directamente a la flora y fauna local. Estas prácticas pueden provocar la fragmentación de los hábitats naturales y alterar las condiciones necesarias para la supervivencia de las especies. Los turistas que transitan por zonas no autorizadas

suelen generar daños a la vegetación al pisar áreas sensibles o recolectar plantas para su uso personal. Además, la perturbación sonora, generada por las actividades humanas y el uso de drones, tiene un efecto negativo significativo en la fauna local, afectando sus comportamientos vitales como la reproducción, la caza y la búsqueda de alimentos. Muchas especies animales, en particular las que dependen de un entorno tranquilo para su bienestar, sufren alteraciones en su comportamiento debido a los ruidos producidos por el paso de turistas y el vuelo de drones. Según Atlas de Ecosistemas (2024), uno de los principales desafíos es la posible intrusión y perturbación que los drones pueden causar en la vida silvestre. El ruido y la presencia visual de los drones pueden generar estrés en los animales, alterando sus patrones de comportamiento y afectando su bienestar. Estas alteraciones inducen un estrés considerable en las especies locales, lo que disminuye su capacidad para adaptarse a las condiciones del entorno y pone en riesgo su estabilidad poblacional.

El riesgo de contaminación del agua es otro de los impactos ambientales graves detectados. Las actividades de camping ilegal y senderismo no autorizado no solo afectan la biodiversidad, sino que también tienen consecuencias negativas para las fuentes hídricas. La acumulación de residuos, como restos de comida, plásticos y otros materiales no biodegradables, puede contaminar ríos, lagos y quebradas cercanas. Esta contaminación compromete la calidad del agua, afectando tanto a los ecosistemas acuáticos como a las comunidades humanas que dependen de estos recursos. Lo más preocupante de la contaminación del agua es que el agua es esencial para la vida de todos los seres vivos, por lo que resulta alarmante cuando se desperdicia o se usa de manera innecesaria. En Colombia, hay varias ciudades que carecen de un sistema de acueducto, por lo que los habitantes deben extraer agua de zonas específicas utilizando baldes, lo que deteriora la calidad de vida y subsistencia de estas personas y sus descendientes (Leal, E., 2021). El agua residual no tratada generada en campamentos ilegales y el uso inapropiado de las fuentes hídricas por los turistas aumentan el riesgo de contaminación, poniendo en peligro tanto la salud humana como la de la fauna acuática.

El incremento del riesgo de incendios es otra consecuencia de las actividades turísticas ilegales. Las fogatas mal apagadas y la falta de control sobre el uso del fuego son factores que

aumentan considerablemente el riesgo de incendios forestales en estas zonas. El camping ilegal en áreas no habilitadas para ello, combinado con la disposición inapropiada de materiales inflamables, puede generar condiciones propicias para el inicio de incendios. Además, los residuos, particularmente aquellos de fácil combustión, contribuyen al aumento de este riesgo. Los drones, aunque utilizados principalmente para fines recreativos o de entretenimiento, también representan un riesgo potencial al generar chispas o fallos técnicos que podrían iniciar un incendio, especialmente en zonas secas o de alta vulnerabilidad. La quema de los páramos en Colombia representa un grave problema ambiental que afecta los ecosistemas de alta montaña. Por ello, es fundamental adoptar medidas efectivas para conservar estos ecosistemas y educar a la población sobre la importancia de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas brindan. Los incendios forestales no solo destruyen la vegetación, sino que también ponen en peligro a la fauna local, alteran el equilibrio ecológico y reducen la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas (Memoria, 2023).

La alteración del suelo y la vegetación es otro impacto significativo derivado de las actividades turísticas no reguladas. El paso constante de personas por áreas no autorizadas afecta la estructura del suelo, provocando su compactación, lo que reduce la capacidad de infiltración de agua, favoreciendo la erosión y la pérdida de fertilidad del suelo. Las zonas de camping ilegales también contribuyen a la destrucción de la vegetación, ya sea por la recolección de leña o por la modificación de la cobertura vegetal para instalar tiendas y otras estructuras temporales. Los residuos dejados por los turistas, especialmente plásticos y metales, pueden quedar atrapados en el suelo, afectando su capacidad de regeneración y acelerando la degradación del hábitat. Además, algunas actividades agrícolas alteran el suelo, afectando la vegetación nativa, lo que impide su crecimiento y reduce la biodiversidad local. La expansión de la frontera agrícola implica una alteración considerable en las condiciones del suelo de páramo, especialmente en su capacidad para almacenar agua cuando se somete a diferentes tipos de uso. Ecológicamente, esto puede afectar la biota del suelo y las interacciones de las diversas comunidades que dependen de él (Engativá Hipólito & Gómez Gómez, 2024).

En conclusión, las acciones identificadas—camping ilegal, senderismo ilegal, generación de residuos, perturbación sonora y vuelo de drones—son responsables de una serie de impactos ambientales significativos en las zonas de frailejones. Estos impactos incluyen la sobrecarga de los ecosistemas, la degradación de la biodiversidad, la contaminación de las fuentes hídricas, el aumento del riesgo de incendios y la alteración de la vegetación y los suelos. Estos hallazgos subrayan la urgencia de implementar políticas y regulaciones más estrictas para controlar las actividades turísticas y mitigar sus efectos negativos en estos ecosistemas frágiles. La gestión efectiva de estas zonas requiere no solo un control sobre la cantidad de turistas y las actividades que realizan, sino también un enfoque integral que promueva la educación ambiental y el respeto por las normas de conservación. La protección de estos ecosistemas debe ser una prioridad para garantizar su conservación a largo plazo y para evitar que los impactos causados por el turismo descontrolado lleguen a ser irreversibles.

8.2 Fase 2. Analizar mediante el uso de ArcGIS Pro las zonas con mayor vulnerabilidad geoespacial ante el turismo

Luego de obtener el mapa de vulnerabilidad se compara la metodología empleada en la creación, con un estudio previo similar, como el trabajo de Batllori y Canto (2022), el cual aborda la vulnerabilidad intrínseca de un ecosistema en el contexto de la contaminación del acuífero kárstico en Yucatán, utilizando anomalías gravimétricas de Bouguer.

Metodología empleada en el estudio del Valle de los Frailejones

Para la construcción del mapa de vulnerabilidad geoespacial del Valle de los Frailejones, se utilizó un enfoque basado en la combinación de diferentes capas de información espacial, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el aspecto, la pendiente y el análisis Kernel, a las cuales se asignaron diferentes pesos en función de su relevancia en el análisis. Los valores de cada capa fueron multiplicados por su peso correspondiente y luego sumados, de acuerdo con la fórmula ponderada.

Este cálculo resultó en un mapa de vulnerabilidad con valores que van del 1 al 5, donde las áreas con valores cercanos a 1 representan baja vulnerabilidad y las zonas cercanas a 5 indican alta

vulnerabilidad. La reclasificación de los valores de vulnerabilidad en rangos claros permitió una representación visual de la vulnerabilidad en el valle, facilitando la identificación de las áreas más críticas para la conservación y manejo del ecosistema de frailejones.

De manera similar, Batllori y Canto (2022) llevaron a cabo una evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de un ecosistema en Yucatán, específicamente en relación con la contaminación del acuífero kárstico. En su trabajo, seleccionaron las variables que influían en la vulnerabilidad del acuífero y les asignaron una ponderación específica. El proceso incluyó la clasificación de la vulnerabilidad en una escala del 1 al 10, basándose en el análisis de cada capa de información y la ponderación correspondiente. Posteriormente, las variables clasificadas se distribuyeron en rangos para representar el grado de vulnerabilidad, lo que dio lugar a la creación de un mapa de vulnerabilidad intrínseca para la región. La integración de los pesos de cada factor se realizó mediante una suma ponderada utilizando la herramienta Spatial Analyst de ArcGIS 9.1, un enfoque que es ampliamente utilizado por su simplicidad y efectividad en la representación de la vulnerabilidad de los ecosistemas.

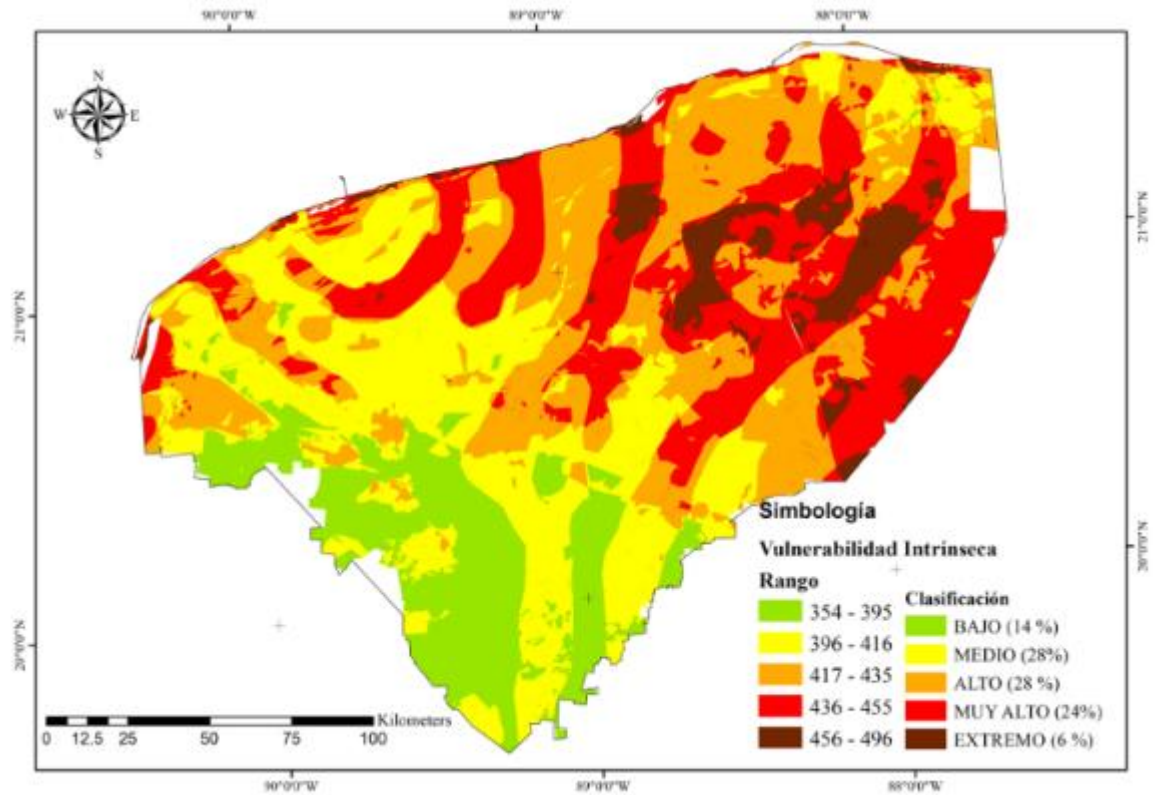
Ambos enfoques, tanto el utilizado en el análisis del Valle de los Frailejones como el aplicado en el estudio de Batllori y Canto (2022), emplean métodos basados en la ponderación de factores clave que influyen en la vulnerabilidad de un ecosistema. En el caso del Valle de los Frailejones, los factores ambientales como el NDVI, el aspecto, la pendiente y el análisis Kernel fueron considerados esenciales para comprender la interacción entre la vegetación, el relieve y elementos antrópicos. Por otro lado, Batllori y Canto (2022) se centraron en la vulnerabilidad del acuífero, incorporando variables geológicas y gravimétricas, lo que demuestra que los enfoques pueden variar según el contexto y los objetivos específicos del análisis de vulnerabilidad.

Una diferencia importante radica en los rangos de clasificación. Mientras que en el estudio de Batllori y Canto se utilizó una escala del 1 al 10 para clasificar los valores de vulnerabilidad, en este caso se optó por una escala más simple de 1 a 5. Esta diferencia podría influir en la precisión y en la interpretación de los resultados, ya que una escala más amplia permite una diferenciación más detallada entre los niveles de vulnerabilidad. Sin embargo, la escala del 1 al 5 utilizada es igualmente efectiva para identificar áreas de alta vulnerabilidad y enfocar los esfuerzos de

conservación en las zonas más críticas. A la hora de representar el mapa en el análisis del acuífero se simplificó la escala de 1 a 5.

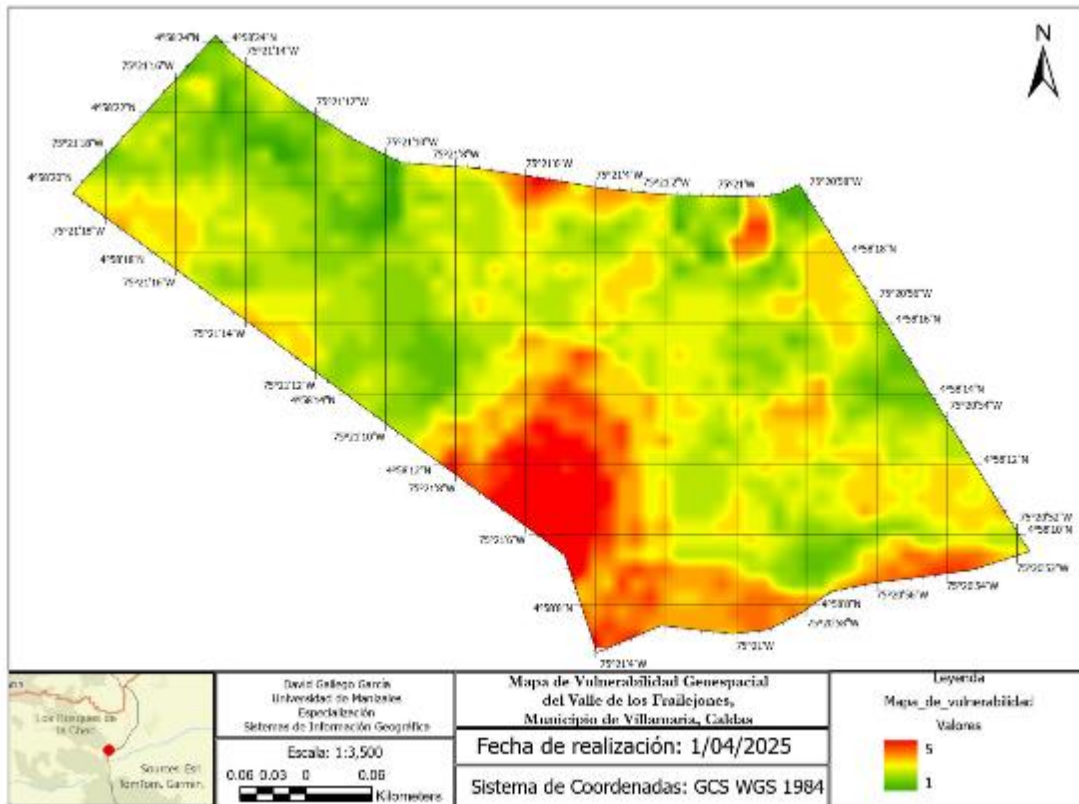
Figura 32

Mapa de vulnerabilidad intrínseca del estado de Yucatán.



Fuente: Batllori y Canto (2022)

Figura 33
Mapa de Vulnerabilidad del Valle de los frailejones.



Fuente: Propia (ArcGIS Pro)

Además, en ambos estudios se utiliza una suma ponderada de los valores de las capas de información para generar un mapa final, lo que asegura que los factores más influyentes tengan un mayor peso en la determinación de la vulnerabilidad. La combinación de las capas de información y la asignación de pesos permiten no solo cuantificar la vulnerabilidad, sino también visualizar la distribución espacial de esta vulnerabilidad en el terreno, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación para la gestión y conservación de los ecosistemas.

8.3 Fase 3. Proponer estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad en la zona de estudio causada por los impactos ambientales del turismo

Es crucial reconocer la relevancia de adoptar enfoques de conservación que integren tanto la gestión ambiental como la participación activa de las comunidades locales. La comparación entre las estrategias propuestas para el Valle de los Frailejones y las implementadas en Colombia para la conservación de los páramos, tal como se menciona en Vergara-Buitrago (2020), proporciona información valiosa para entender cómo diversas iniciativas pueden contribuir a la preservación de estos ecosistemas clave.

La regulación de la capacidad de carga turística es una de las estrategias fundamentales que se deben aplicar en el Valle de los Frailejones, como lo sugieren los estudios sobre el manejo de áreas naturales protegidas en Colombia. Controlar el número de turistas que acceden a las áreas más sensibles de un ecosistema es esencial para evitar la sobrecarga ecológica, que provoca erosión del suelo, alteraciones en la flora y fauna, y la contaminación. Vergara-Buitrago (2020) subraya la importancia de este tipo de regulaciones en las áreas protegidas, especialmente en los ecosistemas de páramo, y sugiere que estas medidas deben estar alineadas con políticas internacionales complementarias, como los sitios Ramsar o las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICAS), con el fin de garantizar a largo plazo la protección de los servicios ecosistémicos.

El establecimiento de senderos autorizados y señalizados es otra estrategia clave para la conservación del Valle de los Frailejones, que también se aplica en áreas de páramo en Colombia. Esta estrategia ayuda a dirigir el flujo turístico hacia rutas específicas, minimizando la perturbación en áreas sensibles. La creación y mantenimiento de estos senderos previene la alteración de la vegetación y la fauna local, especialmente de los frailejones, los cuales son vulnerables a la intervención humana. Este enfoque se complementa con campañas de sensibilización y educación ambiental, esenciales para los proyectos de conservación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia (Vergara-Buitrago, 2020). La educación ambiental, dirigida tanto a turistas como a guías turísticos, fomenta la responsabilidad ecológica y asegura que los visitantes comprendan la importancia de las áreas protegidas y adopten prácticas sostenibles.

Por otro lado, el fortalecimiento de la participación comunitaria en la gestión del turismo es una de las estrategias más efectivas para reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas. Involucrar a las comunidades locales en la planificación y ejecución de las estrategias de conservación fomenta un mayor compromiso con la preservación del medio ambiente y apoya el desarrollo sostenible de las áreas circundantes. Vergara-Buitrago (2020) destaca la importancia de que las estrategias sean integrales, tomando en cuenta los saberes y necesidades de las comunidades locales. Este enfoque inclusivo asegura que las decisiones sobre el uso de los recursos naturales respeten la realidad social y cultural de las comunidades, evitando posibles conflictos.

La restauración ecológica de zonas afectadas es otro componente clave de las estrategias propuestas. La rehabilitación de áreas degradadas, como la replantación de frailejones y otras especies nativas, es fundamental para recuperar la biodiversidad y la funcionalidad del ecosistema. Este proceso también debe incluir el control de especies invasoras, como el retamo espinoso, que amenazan la flora local. La restauración ecológica, como se destaca en las estrategias de conservación de páramos en Colombia, no solo ayuda a restaurar los hábitats naturales, sino que también mejora la resiliencia del ecosistema frente a futuras perturbaciones.

Finalmente, el monitoreo continuo y el uso de tecnología avanzada son esenciales para evaluar el impacto de las actividades turísticas y ajustar las estrategias de gestión en tiempo real. El uso de tecnologías como drones y sensores remotos, que se mencionan en las propuestas para el Valle de los Frailejones, permite un monitoreo eficiente y oportuno de las áreas más vulnerables. En este sentido, el uso de tecnologías de monitoreo también es relevante para los páramos en Colombia, donde el seguimiento constante ayuda a identificar problemas de conservación antes de que se conviertan en amenazas graves (Vergara-Buitrago, 2020).

9. Conclusiones

Las actividades turísticas en ecosistemas de páramo, como el tránsito fuera de senderos establecidos, el uso de vehículos motorizados en áreas sensibles y la alteración de la vegetación nativa, contribuyen significativamente a la degradación ambiental.

La falta de regulación y control en las prácticas turísticas conduce a la pérdida de hábitats críticos y a la disminución de la biodiversidad en estos ecosistemas.

El análisis geoespacial ha identificado áreas críticas dentro del ecosistema de páramo que son altamente susceptibles a los impactos negativos del turismo, debido a su accesibilidad y atractivo para los visitantes.

La superposición de actividades turísticas con hábitats sensibles aumenta la vulnerabilidad de estas zonas, afectando su integridad ecológica.

La implementación de estrategias de conservación que involucren a las comunidades locales ha demostrado ser efectiva en la reducción de la vulnerabilidad ambiental, fortaleciendo la gestión sostenible de los recursos naturales.

La educación ambiental y la sensibilización son fundamentales para promover prácticas turísticas responsables y aumentar la conciencia sobre la importancia de conservar los ecosistemas de páramo.

10. Recomendaciones

Implementar regulaciones estrictas que restrinjan el acceso a áreas sensibles y promuevan el uso de senderos designados para minimizar el impacto en la flora y fauna local.

Establecer límites de capacidad de carga turística para evitar la sobreexplotación de los recursos naturales y garantizar una experiencia sostenible tanto para los visitantes como para el ecosistema.

Promover el ecoturismo responsable, educando a los turistas sobre las prácticas adecuadas y sensibilizándolos sobre la importancia de conservar el entorno natural.

Priorizar la conservación de áreas identificadas como altamente vulnerables, implementando medidas específicas de protección y restauración ecológica.

Utilizar herramientas de monitoreo remoto y sistemas de información geográfica (GIS) para realizar un seguimiento continuo de las condiciones ambientales y ajustar las estrategias de manejo según sea necesario.

Fomentar la colaboración entre autoridades ambientales, operadores turísticos y comunidades locales para desarrollar planes de manejo que equilibren la conservación con las actividades turísticas.

Desarrollar programas de educación ambiental dirigidos a turistas y residentes, enfatizando la relevancia de los páramos y las consecuencias de su degradación.

Establecer incentivos para la participación activa de las comunidades locales en actividades de conservación y en la toma de decisiones relacionadas con el manejo turístico del área.

Crear alianzas público-privadas que apoyen proyectos de infraestructura sostenible y servicios turísticos que minimicen el impacto ambiental, como la construcción de alojamientos ecológicos y la promoción de transporte de bajo impacto.

Referencias

- Admin. (2024, 4 enero). ¿Cómo afecta el turismo al medio ambiente (impacto ambiental del turismo)? *Ecológico y Sostenible*. Recuperado de <https://tinyurl.com/yck4hhww>
- Atlas de Ecosistemas. (2024, 21 febrero). Drones y fauna silvestre: Herramientas para la investigación y protección de especies. Recuperado de <https://tinyurl.com/5av8ek75>
- Batllori, E., & Canto, S. (2022). Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero kárstico en Yucatán, considerando las anomalías gravimétricas de Bouguer. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1), e130921. <https://tinyurl.com/22965yw9>
- Burbano-Figueroa, O., Galindez-Chicaíza, E., Benítez-Arteaga, J., Álvarez, V., Flórez Casanova, A., Betancourth-García, A., Salazar-González, C., Lagos Mora, E., & de correspondencia, A. (2020). Declive y muerte de los frailejones en los ecosistemas alpinos de los Andes del Norte: Modelo conceptual. *Preprint Artículo de Revisión Crítica*.
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino.
- Departamento Administrativo de la Función Pública [DAFP]. (2018). *Ley 1930 de 2018*. Recuperado de <https://tinyurl.com/pdr8775h>
- De Groot, R. (2013). Integrated valuation of biodiversity and ecosystem services for better decision making. Ponencia presentada en el *Simposio de Servicios Ecosistémicos*, Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C.
- Diazgranados, M. (2015). Una mirada biológica a los páramos circundantes a la Sabana de Bogotá. Recuperado de <https://tinyurl.com/2s8c7w4x>
- Ecotourism World. (2023). El impacto del turismo en la destrucción de la naturaleza. Recuperado de <https://tinyurl.com/2u9dz373>
- Engativá Hipólito, C. E., & Gómez Gómez, C. G. (2024). Afectación de las propiedades físicas y químicas del suelo por la expansión de la frontera agrícola en el páramo de Sumapaz [Tesis de especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Recuperado de <https://tinyurl.com/2x5hjwb5>
- El Cronista. (2023, 27 octubre). Vía Ibagué – Manizales que pasa por Líbano y Murillo está lista para transitar. Recuperado de <https://tinyurl.com/yc3crd3a>
- El Tiempo. (2023a). El Parque Nacional Los Nevados está en crisis por el turismo depredador. Recuperado de <https://tinyurl.com/mr3jjppe>

- El Tiempo. (2023b). Los ‘toyoteros’ y ‘ralís’ que están destruyendo los frailejones de los páramos de Cundinamarca. Recuperado de <https://tinyurl.com/ycy89tjw>
- García, N., Calderón, E., & Galeano, G. (2005). Frailejones. En *Libro rojo de plantas de Colombia* (Vol. 2, pp. 225-244). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Greenpeace. (2013). *Informe Páramos en peligro*. Recuperado de <https://tinyurl.com/mrm97uns>
- Hofstede, R., Segarra, P., Mena V., P., & Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. (2003). *Los páramos del mundo*. UICN.
- Hofstede, R., et al. (2014). *Los Páramos Andinos: ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://tinyurl.com/4jf2sphw>
- Fraile, R. G. L. (2017). Estrategias para la gestión sostenible del ecoturismo en el Páramo de Chingaza. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 22(1), 89-102. Recuperado de <https://tinyurl.com/ytmrhtk7>
- La Patria. (2021, 3 marzo). Visitantes están impactando con sus actividades el páramo y el Nevado en Caldas. Recuperado de <https://tinyurl.com/zzfw8tju>
- Leal Esper, Y. E. (2021). La contaminación ambiental y su influencia en los ecosistemas de páramo. *Revista Academia & Derecho*, 12, número especial.
- Martínez-Bernal, L. (2020). El turismo en los parques naturales nacionales de Colombia: Una evaluación del impacto ambiental de esta actividad y sus perspectivas en un escenario postconflicto. Recuperado de <https://tinyurl.com/2fj8mvcc>
- Medina, E., Huber, O., Nassar, J. M., & Navarro, P. (2013). *Recorriendo el paisaje vegetal de Venezuela*. IVIC.
- Memoria, S. (2023, 27 marzo). La quema de frailejones: un crimen contra los páramos. *Señal Memoria*. Recuperado de <https://tinyurl.com/53w4pft4>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2023). *Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos*. Recuperado de <https://tinyurl.com/39k5csc4>
- Morales-Betancourt, J. A., & Estévez-Varón, J. V. (2006). El páramo: ¿Ecosistema en vía de extinción? *Revista Luna Azul*, 22, 39-51. Recuperado de <https://tinyurl.com/ys7h4wj4>

- Nieto, M., Cardona, L. F., Agudelo, C., & Regulación, P. Y. (2015). *Páramos vivos: Hojas de ruta • Guías para el estudio socio ecológico de la alta montaña en Colombia: Servicios ecosistémicos*.
- Paredes-Leguizamón, G. (2014). Análisis de la factibilidad política, técnica y operativa de declarar zonas amortiguadoras o reglamentar la función amortiguadora del Sistema de Parques Nacionales de Colombia. *Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Recuperado de <https://tinyurl.com/y3fvjcep>
- Patrimonio Natural. (2021). *Guía de sostenibilidad en áreas protegidas*. Fundación Patrimonio Natural. Recuperado de <https://tinyurl.com/you2kpyv3>
- Pérez, J. A., & Gómez, M. L. (2015). *Adaptándose en los páramos*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Recuperado de <https://tinyurl.com/4b26hkff>
- Pérez, J., & Ramírez, F. (2019). Impactos del turismo en ecosistemas frágiles: El caso de los páramos en Colombia. *Revista de Gestión Ambiental*, 14(2), 87-105. Recuperado de <https://tinyurl.com/59cuh7up>
- Pineda, J. A. (2023, 17 noviembre). ¿Qué es un páramo y su importancia para el medio ambiente? *En Colombia*. Recuperado de <https://tinyurl.com/2su7aw85>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2018). *Plan de conservación y manejo de los frailejones del territorio CAR* (1.ª ed., Número 1). Recuperado de <https://tinyurl.com/yvx6f42w>
- Portillo, S. R. (2020, 4 febrero). Páramo: características, flora y fauna. *Ecologiaverde.com*. Recuperado de <https://tinyurl.com/ab5jnzas>
- Ramírez Gómez, J. C., & Rodríguez Erazo, N. (2024). Evaluación de la vulnerabilidad del complejo de páramos Pisba (Boyacá) frente al uso del suelo usando SIG y AHP. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 33(2), 347–368. <https://tinyurl.com/5habrhfb>
- Rivera Ospina, D., & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*.
- Rodríguez, D. (2023, 17 octubre). Páramo. *Lifeder*. Recuperado de <https://tinyurl.com/26n98fy7>
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K., & Auer, I. (2017). The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800-2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(2), 115–125. <https://tinyurl.com/muxruxxm>
- Ruiz González, P. A. (2020). Evaluación de los impactos ambientales del turismo en la Laguna de los Tunjos.

Sebastián Gómez, J., María, A., & Ramírez Villa, C. (2019). Delimitación de la zona de amortiguamiento del páramo de Murillo, Tolima para la conservación del ecosistema.

Segui, P. (2023, 19 diciembre). Páramo: Clima, flora, fauna y características. *OVACEN*. Recuperado de <https://tinyurl.com/567fsze4>

Tipaz Cuaical, L. E., & Cardona Palacio, L. F. (2023). Análisis del crecimiento y mortalidad del frailejón (*Espeletia pycnophylla*) en los bordes de cuencas hidrográficas en el municipio de Cumbal, Nariño, Colombia. *Ingeniare*, 34, 11–28. <https://tinyurl.com/yc47p6hr>

Universidad de América. (2023). *Evaluación del impacto ambiental en áreas protegidas*. Repositorio Universidad de América. Recuperado de <https://tinyurl.com/2s3kk2a6>

Unknown. (2015). Páramo: Un ecosistema en peligro. *Blog de Ecología*. Recuperado de <https://tinyurl.com/bdxx2t7n>

Vergara-Buitrago, P. A. (2020). Estrategias implementadas por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia para conservar los páramos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 167-176. <https://tinyurl.com/mrk7nhkr>

Anexos

Fotos Tabla 8 Descripción puntos de observación



Fuente: Propia.