

Cambios en la flora y propiedades del suelo tras un incendio en el Páramo del Almorzadero

Nelcy Mayerli Hernández Mora

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc en Bosques y Conservación Ambiental

Codirector

Sergio Andrés Bolívar Santamaría

MSc en Biología

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa Ingeniería forestal

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado primero a Dios, quien ha sido mi mayor fortaleza en cada paso de este camino, agradezco infinitamente por darme la luz y la perseverancia para alcanzar este logro tan significativo. A mi mamá, y a mi papá, quienes con su amor, sacrificio y apoyo incondicional han estado siempre a mi lado, brindándome todo lo que he necesitado. Este triunfo es también suyo, pues sus enseñanzas y dedicación me han impulsado a ser mejor cada día, también a mi hijo, mi mayor inspiración, gracias por llenarme de motivos para soñar y trabajar con pasión, eres el motor que da sentido a cada esfuerzo y logro, A mis hermanos, quienes de una u otra manera influyeron en el éxito de este trabajo de grado, les agradezco por su apoyo y ejemplo. Sus palabras de aliento y compañía han sido valiosas en este recorrido, A todos ustedes, dedico con todo mi corazón este fruto del esfuerzo y la dedicación. Gracias por ser mi fuerza y mi motivación constante.

Agradecimientos

Este logro no habría sido posible sin el valioso apoyo de numerosas personas e instituciones, a quienes expreso mi más profundo agradecimiento. Principalmente la Universidad Industrial de Santander, por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional y el espacio para llevar a cabo este proyecto. A mi director, Diego Suescún Carvajal, magíster en Bosques y Conservación Ambiental, y a mi codirector, Sergio Andrés Bolívar Santamaría, magíster en Biología, por su orientación constante, su paciencia y su dedicación en la supervisión de este trabajo. Su experiencia y consejos fueron fundamentales para alcanzar este objetivo. Al señor Leonardo Merchán, por permitirme acceder a su finca y colaborar como guía durante los recorridos y la toma de datos, Su generosidad y disposición fueron imprescindibles para el desarrollo de esta investigación, y también al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Medellín, por facilitar los análisis necesarios y contribuir al rigor científico de este trabajo.

Nelcy Mayerli Hernández Mora.

Tabla de Contenido**Pág.**

Introducción	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3.Marco referencial	15
3.1.Marco teórico	15
3.1.1.Páramos	15
3.2 Efecto de los incendios en los ecosistemas.....	15
3.3 Imágenes satelitales para el monitoreo post incendios forestales.....	16
4. Metodología	17
4.1 Área de estudio	17
4.2 Diseño experimental	18
4.2.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo.	18

4.2.2. Composición, riqueza, diversidad y estructura de la vegetación.....	19
4.2.3 Implementación de índices espectrales	19
4.2.4 Implementación de parámetros biofísicos	20
4.3 Procesamiento de datos.....	21
5.Resultados	23
5.1 Propiedades físicas y químicas del suelo.....	23
5.2 Identificación por parcela	24
5.3 Identificación por familia.....	26
5.4 Índices diversidad alfa	27
5.5 Variables estructurales	31
6. Discusión.....	35
7.Conclusiones	37
8. Recomendaciones.....	39
Referencias bibliográficas	40

Lista de Tablas**Pág.**

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo en áreas afectadas y no afectadas por el incendio	24
Tabla 2. Familias, géneros especies e individuos por parcela. Q (quemado); NQ (no quemado)	25
Tabla 3. Número de familias, géneros especies e individuos por familia.....	26
Tabla 4. Índices de diversidad alfa entre parcelas. Q (quemado); NQ (no quemado)	27
Tabla 5. Categoría de amenaza de las especies registradas	28
Tabla 6. Valores promedio (con su desviación estándar-DE) de las variables estructurales de la vegetación entre la zona quemada (Q) y no quemada (NQ).	31

Lista de Figuras

	Pág.
Figura. 1 Mapa de zona de estudio Municipio Cerrito Santander Pàramo del Almorzadero.....	18
Figura. 2 Firmas espectrales en los sitios quemados y no quemados	33
Figura. 3 Índices espectrales y parámetros biofísicos en los sitios quemados y no quemados.....	34

Lista de Apéndices

	pág.
Apèndice. A Resultados del laboratorio muestras de suelos.....	46
Apèndice. B Formato de campo toma de datos parcelas	47
Apèndice. C Registro fotogràfico, montura de parcelas y recolecci3n de muestras.....	48

Glosario

Áreas quemadas (AQ): superficie afectada por un incendio, medida para evaluar el impacto del fuego en el ecosistema.

Biomasa: cantidad total de materia orgánica de los organismos en un área, utilizada para evaluar la salud y productividad del ecosistema.

Cordillera Oriental de Santander: cadena montañosa en Colombia donde se encuentra el páramo de Almorzadero, afectado por el incendio.

Diversidad: variedad de especies en un ecosistema, que incluye la riqueza y la distribución de estas.

Espectro electromagnético: rango de longitudes de onda de la luz que un satélite puede captar para analizar características de la superficie terrestre.

Fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR): medida de la fracción de luz solar que es absorbida por las plantas y utilizada en la fotosíntesis.

Georreferenciación: proceso de asignar coordenadas geográficas a un lugar específico, utilizado para ubicar muestras en un mapa.

Índice de área foliar (LAI): medida de la superficie de hojas en un área determinada, importante para evaluar la salud de la vegetación.

Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI): índice espectral utilizado para evaluar el daño causado por incendios en la vegetación.

Índices espectrales: herramientas matemáticas utilizadas para analizar imágenes satelitales y extraer

información sobre características específicas de la superficie.

Muestreo aleatorio: técnica de recolección de muestras donde cada elemento tiene la misma probabilidad de ser elegido, garantizando la representatividad.

Parcelas: áreas delimitadas donde se realizan observaciones y mediciones de la vegetación y otros parámetros ecológicos.

Riqueza: número total de especies presentes en un área determinada.

Sentinel-2: satélite de observación de la Tierra que proporciona imágenes de alta resolución y datos espectrales para el análisis ambiental.

Software especializado: programas informáticos diseñados para realizar análisis estadísticos y ecológicos, facilitando la interpretación de datos.

Índices de Simpson y Shannon: métodos estadísticos utilizados para medir la diversidad de especies en un ecosistema, considerando la abundancia y riqueza de las especies.

Resumen

Título: Cambios en la flora y propiedades del suelo tras un incendio en el Páramo del Almorzadero

Autor: Nelcy Mayerli Hernández Mora

Palabras Clave: servicios ecosistémicos, carbono del suelo, ecosistemas alto andinos, *Espeletia*, frailejón.

Descripción:

La investigación baso en el análisis de un área afectada por un incendio en el páramo del Almorzadero, ubicado en la Cordillera Oriental de Santander, Colombia, específicamente en el municipio de Cerrito, donde se registró un incendio el 2 de febrero de 2019 afectando aproximadamente 383,4 ha. El estudio se basa en la identificación de la zona mediante imágenes del satélite Sentinel-2, que permitieron obtener información espectral en 13 bandas para luego estimar índices como el área quemada (AQ) y el índice de relación de calcinación normalizado (NBRI), los cuales fueron útiles para caracterizar la variabilidad espectral de la vegetación natural y en las áreas incendiadas. También se recolectaron ocho muestras de suelo (cuatro de la zona quemada y cuatro de la no quemada) para su análisis en laboratorio. Se evaluaron propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En cuanto a la vegetación, se establecieron 24 parcelas de 5x5 m, con el objetivo de analizar la composición, riqueza y estructura de las especies vegetales presentes, midiendo variables morfológicas y determinando la abundancia y frecuencia de cada especie. Finalmente, se llevaron a cabo análisis de diversidad y composición florística, utilizando índices como Simpson, Shannon y Magalef, que permitieron evaluar la riqueza y distribución de las especies en el área natural y área afectada. Estos análisis se realizaron con software especializado, garantizando un enfoque riguroso y detallado en la evaluación del impacto del incendio en el ecosistema del páramo. Se encontró que los incendios afectan negativamente la calidad del suelo, disminuyendo el contenido de materia orgánica y carbono, lo que afecta la fertilidad y capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales. Esta alteración en las propiedades físicas y químicas del suelo resalta la necesidad de entender mejor la dinámica del suelo post-incendio.

¹Trabajo de Grado.

² Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería forestal.
Director: MSc. en Manejo, Uso y Conservación del Bosque Diego Suescún Carvajal, Codirector: Bolívar Santamaría Sergio Andrés MSc. en Biología

Abstract

Title: Changes in flora and soil properties after a fire in the Almorzadero Páramo³

Author: Nelcy Mayerli Hernández Mora

Keywords: ecosystem services, soil carbon, high Andean ecosystems, *Espeletia*, frailejón.

Description:

The research was based on the analysis of an area affected by a fire in the Almorzadero moor, located in the Eastern Cordillera of Santander, Colombia, specifically in the municipality of Cerrito, where a fire was recorded on February 2, 2019, affecting approximately 383.4 hectares. The study is based on the identification of the area using images from the Sentinel-2 satellite, which allowed for the acquisition of spectral information in 13 bands to subsequently estimate indices such as burned area (BA) and the normalized burn ratio index (NBRI), which were useful for characterizing the spectral variability of natural vegetation and in the burned areas. Eight soil samples were also collected (four from the burned area and four from the unburned area) for laboratory analysis. Physical, chemical, and biological properties of the soil were evaluated. Regarding vegetation, 24 plots of 5x5 m were established, aiming to analyze the composition, richness, and structure of the present plant species by measuring morphological variables and determining the abundance and frequency of each species. Finally, diversity and floristic composition analyses were conducted using indices such as Simpson and Shannon, which allowed for the evaluation of species richness and distribution in the natural area and the affected area. These analyses were carried out with specialized software, ensuring a rigorous and detailed approach to assessing the impact of the fire on the moor ecosystem. It was found that fires negatively affect soil quality, thereby decreasing organic matter and carbon content, which impacts soil fertility and its ability to retain essential nutrients. This alteration in the physical and chemical properties of the soil highlights the need to better understand the dynamics of post-fire soil.

³ Bachelor Thesis

⁴ Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería forestal. Director: MSc. en Manejo, Uso y Conservación del Bosque Diego Suescún Carvajal, Codirector: Santamaría Bolívar Sergio Andrés MSc. en Biología.

Introducción

Los ecosistemas de páramo son fundamentales para el equilibrio ambiental, ya que presentan características climáticas, geomorfológicas y bióticas que les permiten ofrecer servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades humanas (Vargas, 2011). En estos hábitats, se albergan diversas especies nativas y endémicas, destacando que seis de cada diez especies de plantas que se encuentran en los páramos son exclusivas de estas áreas. Estas plantas desempeñan un papel crucial al almacenar agua y carbono, lo que contribuye a la mitigación y adaptación del cambio climático (Beniston, 2003). No obstante, los páramos enfrentan múltiples agentes de perturbación que alteran sus procesos y funciones, tales como la expansión de la frontera agrícola, el calentamiento global y, en particular, los incendios. Estos últimos han emergido como una problemática significativa, cuyas consecuencias aún no han sido estudiadas en profundidad.

Los incendios en los páramos generan impactos relevantes en la estructura del suelo, disminuyendo la disponibilidad de nutrientes y afectando la retención de agua. Asimismo, provocan daños directos en las comunidades vegetales, lo que resulta en cambios en su composición y una notable disminución de la biodiversidad (González, 2009). En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto de los incendios sobre la riqueza, composición, diversidad y estructura de la vegetación, las propiedades fisicoquímicas del suelo y en los índices espectrales en un sitio del páramo del Almorzadero? Este tipo de investigación es indispensable para evaluar el impacto de los incendios en los páramos, proporcionando información valiosa que puede beneficiar a la comunidad y facilitar la toma de decisiones en materia de conservación y restauración de estos ecosistemas vitales.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de los incendios sobre la riqueza, composición, diversidad y estructura de la vegetación, las propiedades fisicoquímicas del suelo y en los índices espectrales en un sitio del páramo del Almorzadero.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas y químicas del suelo en áreas afectadas y no afectadas por el incendio.
- Comparar la riqueza, composición, diversidad y estructura de la vegetación en áreas afectadas y no afectadas por el incendio.
- Identificar cambios en la reflectancia de la vegetación utilizando índices espectrales y parámetros biofísicos estimados con imágenes de Sentinel-2.

3. Marco referencial

3.1. Marco teórico

3.1.1. Páramos

Los páramos son ecosistemas de montaña que se desarrollan por encima de los bosques andinos, a alturas que pueden ser superiores a los 3000 m s. n. m. Por su ubicación en la zona ecuatorial, presentan un clima frío todo el año y sus suelos de origen volcánico suelen ser muy fértiles (Llambí, 2012). La gran mayoría de los páramos se encuentran en Colombia (42%) y Ecuador (37%), aunque también los hay en el norte de Perú, el occidente de Venezuela y en Costa Rica (Beniston, 2003).

Los páramos de Colombia además de suministrar el 70% de agua potable del país, son santuarios naturales que albergan gran diversidad de fauna y flora del territorio nacional (Palacio, 2024). Los páramos pueden considerarse ecosistemas estratégicos principalmente por su papel en la regulación del ciclo hidrológico, este alimenta el suministro de recurso hídrico para consumo humano y desarrollo de actividades económicas de la población. Además de su alta riqueza biológica, estos territorios se caracterizan por su alta diversidad sociocultural, circunstancias que han despertado un especial interés por su conservación y manejo sostenible (Guimarães, 2001).

3.2 Efecto de los incendios en los ecosistemas

Los incendios forestales tienen impactos complejos de entender sobre los procesos ecológicos, debido a la diversidad del paisaje y las respuestas diferenciales de los distintos tipos de vegetación (Lloret, 2009). El aumento de la frecuencia de los incendios en conjunto con periodos de sequía prolongada, pueden generar impactos ambientales a largo plazo, tales como disminución de la productividad de los ecosistemas, desertificación y la destrucción del hábitat, entre otros. Los efectos de los incendios se asocian con la intensidad, recurrencia y duración del fenómeno, estos efectos pueden ser directos tales

como muerte de animales, pérdida de la vegetación y degradación del suelo; o efectos indirectos como la erosión del suelo, la contaminación del agua y deslizamientos de tierra (Ubeda y Sarricolea, 2016). Particularmente, el páramo puede retener durante periodos prolongados el carbono de la materia orgánica presente en el suelo, la cual se descompone muy lentamente por las bajas temperaturas (Roa & Brown, 2016). De esa manera, el carbono se ha acumulado en el suelo por lo menos durante unos 10.000 años hasta constituir un 50% del peso del suelo del páramo (Pasquale et al., 2008).

Si se reduce la superficie del páramo se está reduciendo también la cantidad de carbono capturado, además al quemar se libera CO₂ a la atmósfera (Montes, 2017). Los incendios en los páramos pueden traer algunas consecuencias sobre las propiedades del suelo, como la pérdida de hasta un 50% de la materia orgánica, el incremento de la hidrofobicidad del suelo, se reduce la capacidad de absorción de agua a medida que aumenta la escorrentía superficial y la erosión, se reduce la conductividad hidráulica, se reduce la capacidad de intercambio catiónico, se aumenta el pH, disminuyen las bases (calcio, magnesio y potasio), aumenta el aluminio, hierro y silicio, aumenta la densidad aparente y disminuye la porosidad. También se ha documentado un mayor efecto en estos cambios cerca de la superficie del suelo, generando un impacto negativo en el banco de semillas y su tasa de germinación (Camargo-García et al., 2012).

3.3 Imágenes satelitales para el monitoreo post incendios forestales

Las imágenes satelitales hacen posible la caracterización de las distintas coberturas vegetales, permiten el monitoreo de la vegetación y los usos del suelo a través del tiempo. Además, facilitan el análisis espacial de la información para la gestión del riesgo, el aprovechamiento del suelo y de los sistemas productivos propios de cada región para impulsar su desarrollo (Molina et al., 2005). Las imágenes satelitales son una herramienta útil para la detección y evaluación de áreas afectadas por incendios forestales, lo cual se logra a través de la implementación de índices espectrales que han demostrado ser eficientes al momento de determinar el área quemada o monitorear su comportamiento a través del tiempo. Sin embargo, es necesario avanzar en el establecimiento de una metodología para determinar los umbrales de la severidad de los incendios forestales y establecer que índice es el más

adecuado para los distintos ecosistemas (Silva, 2021).

4. Metodología

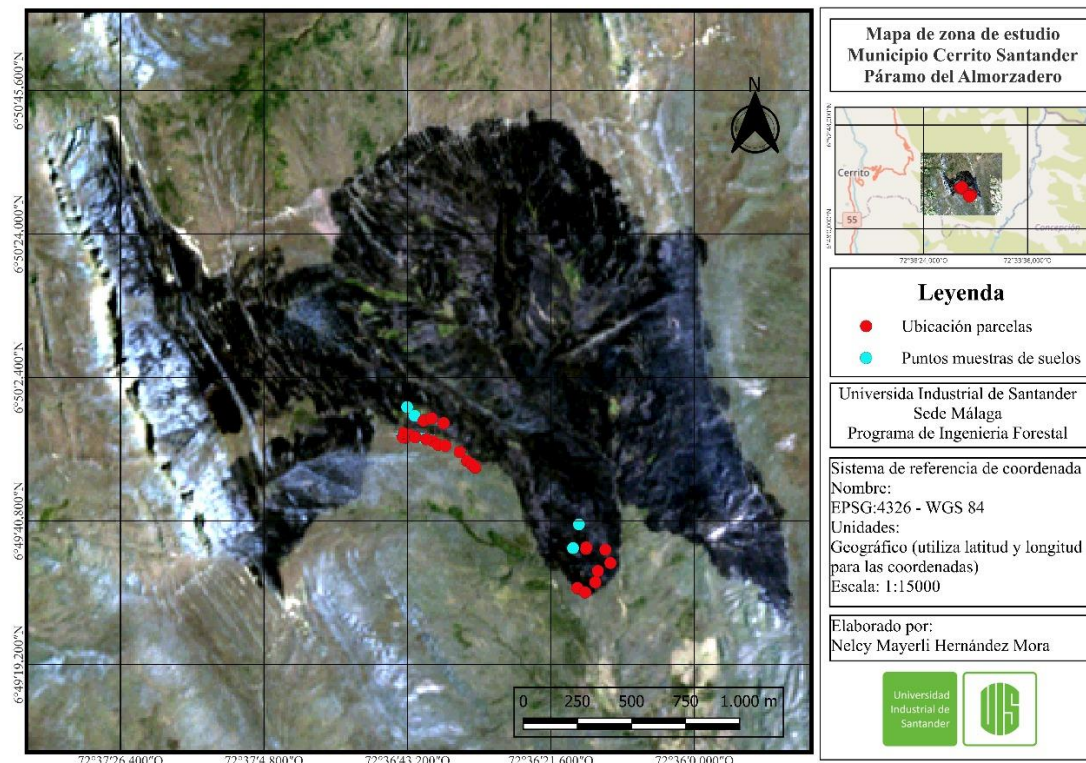
4.1 Área de estudio

Para la implementación de la metodología, se analizó un área afectada por incendio en el páramo del Almorzadero, ubicado en la Cordillera Oriental, departamento de Santander (Colombia). Este páramo comprende un área de 156.000 ha, ubicado entre los 2800 y 4530 m s. n. m (MADS, 2024). El presente estudio se realizó en el municipio de Cerrito, en un área que fue incendiada el 2 de febrero de 2019 (Figura. 1) esta zona comprende un área aproximadamente de 383,4 ha, con altitudes entre 3600 y 3900 m s. n. m., y con coordenadas $6^{\circ}49'48,02''N$ y $72^{\circ}36'57,44''O$ aproximadamente.

La identificación del área de estudio se llevó a cabo por medio de imágenes del satélite Sentinel-2. Dada la resolución espectral que tienen las imágenes satelitales (13 bandas), con las cuales se pudo capturar información no solo en el visible sino también en el infrarrojo cercano, se estimaron distintos índices espectrales como área quemada (AQ) e índice de relación de calcinación normalizado (NBRI) entre otros, los cuales permiten caracterizar la variabilidad espectral entre las coberturas vegetales y las zonas afectadas por incendios (Austin, 1917).

Figura. 1

Mapa de zona de estudio Municipio Cerrito Santander Páramo del Almorzadero



Nota: Mapa zona de estudio municipio de Cerrito, Santander, puntos de toma de muestras de parcelas y suelos.

4.2 Diseño experimental

4.2.1 Propiedades físicas y químicas del suelo

Se realizó la toma de ocho muestras de suelo aleatoriamente, cuatro en zona quemada y cuatro en la zona no quemada, con el fin de determinar propiedades físicas (textura) y químicas (pH, CIC, materia orgánica y concentración de Ca, Mg, K, P y N). Para la toma de las muestras de suelo, se utilizó un balde y herramientas previamente desinfectadas, se usó un GPS para la georreferenciación de los puntos de muestreo, se identificaron las zonas previamente seleccionadas de forma aleatoria con la herramienta *Random points* o puntos aleatorios de QGIS. Las muestras se rotularon indicando el número de la muestra,

coordenadas, fecha y, posteriormente, fueron transportadas en bolsas plásticas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (Apéndice. A).

4.2.2. Composición, riqueza, diversidad y estructura de la vegetación

Se montaron en total 24 parcelas cuadradas de 5x5 m (25 m²), 12 en la zona quemada y 12 en la zona no quemada. Estas parcelas se distribuyeron en tres transectos de cuatro parcelas en sentido de la pendiente del terreno Apéndice. B . Cada parcela se delimitó con estacas y cabuya, estas fueron georreferenciadas con un GPS. Dentro de cada parcela se colectaron las muestras botánicas para la determinación taxonómica con la ayuda de claves, herbarios virtuales y consulta a expertos. Se midieron algunas variables morfológicas a todos los individuos dentro de la parcela: diámetro a la altura del cuello (DAC), altura, área de copa y diámetro de copa. Por otro lado, se determinó la abundancia y frecuencia de cada especie y el porcentaje de cobertura vegetal de cada parcela. Para el caso de los frailejones adultos se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), mientras que a los juveniles se les midió el (DAC) (Apéndice. C)

4.2.3 Firmas espectrales

Se descargaron dos imágenes de Sentinel-2 con correcciones atmosféricas (L2A) de la zona de estudio, un pre-incendio (01 de enero de 2019) y otro post-incendio (05 de febrero de 2019), se caracterizaron las firmas espectrales de los sitios quemados y no quemados en donde se establecieron las parcelas de vegetación y en donde se tomaron las muestras de suelos.

Además, se analizaron tres índices espectrales antes y después del incendio, utilizando las imágenes Sentinel-2 a escala 1:20.000, estos índices son una transformación de las magnitudes físicas capturadas por el sensor y se convierten en valores numéricos almacenados en formato ráster, que tienen por objetivo resaltar información geográfica o dinámicas espacio temporal en función de su firma radiométrica (Silva et al., 2021).

4.2.4 Implementación de índices espectrales

Área quemada (AQ): este índice es una operación aritmética básica, se relacionan las magnitudes físicas de las bandas B8a y B11, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta respectivamente del satélite Sentinel-2.

$$AQ = B8a / B11 \quad (1)$$

Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI): utiliza las bandas B8a infrarrojo cercano y B11 infrarrojo de onda corta, se utilizará para destacar las áreas calcinadas con la característica de que se normaliza aplica las mismas bandas espectrales.

$$NBRI = (B8a - B11) / (B8a + B11) \quad (2)$$

Índice de vegetación normalizado (NDVI): ha sido ampliamente reconocido por sus características diferenciales para destacar el componente de la biomasa, es operado mediante las bandas del rojo B4 y la banda del infrarrojo cercano B8.

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (3)$$

Este índice es muy utilizado por sus ventajas para caracterizar la vegetación fotosintéticamente activa (GeoInnova, 2021)

4.2.5 Implementación de parámetros biofísicos

Para el caso de los parámetros biofísicos, con Sentinel-2 se estimaron los siguientes, utilizando la herramienta *Biophysical Processor* en el software SNAP (Sentinel Application Platform):

- El Índice de Área Foliar (LAI)

Es un índice adimensional que mide el área de la hoja verde unilateral sobre una unidad de tierra (m^2 / m^2), fue definido por primera vez en 1947 por J. Watson como el total del área de una cara del tejido fotosintético por la unidad de superficie del terreno (Watson, 1947). Una manera más práctica y fácil de entender este concepto consiste en verlo como la representación de la cantidad de superficie foliar (m^2) que se encuentra en una determinada superficie de terreno (m^2) (Aguirre-Salado et al., 2011).

- La fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR)

Es la fracción de la radiación solar entrante absorbida para la fotosíntesis por un organismo fotosintético (hojas vivas). Se utiliza, además para calcular la fotosíntesis de la superficie y la evapotranspiración, las cuales a su vez se utilizan para calcular la energía terrestre, el almacenamiento y fijación de carbono, los procesos del ciclo del agua y la biogeoquímica de la vegetación (Myneni, 2015).

- Fracción de Cobertura Vegetal verde (FCOVER)

Corresponde a la fracción de suelo cubierto por vegetación verde. En la práctica, cuantifica la extensión espacial de la vegetación. Debido a que es independiente de la dirección de iluminación y es sensible a la cantidad de vegetación (Song et al., 2017).

4.3 Procesamiento de datos

- Composición florística y diversidad

Los análisis de diversidad y composición florística se refieren al estudio de las diferentes especies que conforman la comunidad vegetal. Para esto se pueden encontrar diferentes propuestas metodológicas para analizar la diversidad de especies, dentro y entre coberturas. Este estudio, en particular se enfocó en la diversidad existente en cada rango altitudinal, llamada diversidad alfa.

Para su determinación, se obtuvo el número de familias, géneros, morfoespecies e individuos, además, del número de especies e individuos por familia. Se estimaron los índices de diversidad alfa como Simpson, Shannon , Margalef y coeficiente de mezcla los cuales se basan en el número de especies (riqueza) y sus abundancias relativas (Moreno, 2001). El Índice de Simpson señala la probabilidad de que dos individuos tomados aleatoriamente en una muestra pertenezcan a la misma especie, y está fuertemente influenciado por la importancia de las especies más dominantes en las coberturas.

El valor del Índice de Simpson siempre será inverso a la equidad, por lo que la diversidad se calcula como $1 - \lambda$ (Lande, 1996). Matemáticamente, el Índice de Simpson se expresa así: $\lambda = \sum (ni/N)^2$

El símbolo λ representa el Índice de Simpson; n_i denota el número de individuos de la especie i mientras que N , el número total de individuos de todas las especies registradas.

Por otro lado, el Índice de Shannon expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies registradas, teniendo en cuenta el grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenece un individuo escogido al azar de una colección (Baev & Penev, 1995). Es decir, éste índice asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra. Cuando los valores son cercanos a cero, la diversidad es baja o en otras palabras hay pocas especies (Magurran, 1988). Matemáticamente, el Índice de Shannon se expresa así:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i.$$

Donde P_i denota la abundancia proporcional de la especie i , es decir, el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

También se calculó el Cociente de Mezcla como indicador del grado de homogeneidad o heterogeneidad de las coberturas. Este factor que relaciona el número de especies con el número de individuos totales sirve para tener una idea del grado de intensidad de mezcla, es decir, de la forma en que se distribuyen los individuos de las diferentes especies dentro de las coberturas. Los valores del Cociente de Mezcla se relacionan con el menor DAP registrado y con el tamaño del muestreo. El cálculo de este parámetro se efectuó mediante la siguiente expresión:

$$CM = \sum (n_i S)$$

Donde CM denota el Cociente de Mezcla; n representa al número total de individuos de todas las especies en la cobertura (i); S : Número total de especies en la cobertura (i)

Para identificar las especies más abundantes y frecuentes, se conformaron diferentes tablas con la distribución de los taxones (familias, géneros, especies e individuos). Finalmente, con el objetivo de comparar la diversidad entre parcelas y coberturas en función de las curvas de acumulación, se hicieron las curvas de acumulación especies-área y especies-individuos para cada una de las parcelas, sumando el área de las 12 parcelas por sitio.

El índice de Margalef es una medida utilizada en ecología para evaluar la biodiversidad de una comunidad. Se basa en el número de especies presentes en relación con el número total de individuos. La fórmula para calcular el índice de Margalef (D) es la siguiente:

$$D = \frac{S - 1}{\ln(N)}$$

donde:

- (S) es el número total de especies en la muestra.
- (N) es el número total de individuos contados.
- (ln) es el logaritmo natural.

Aplicación del Índice de Margalef

Para utilizar el índice de Margalef en su proyecto, primero se debe realizar un muestreo de la comunidad que se desea estudiar, registrando tanto el número de especies como el total de individuos. Luego, aplicando la fórmula mencionada para calcular el índice. Un valor más alto indica una mayor diversidad de especies.

5. Resultados

5.1 Propiedades físicas y químicas del suelo.

Los resultados revelan un impacto debido al incendio en la calidad del suelo sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo dejando ver diferencias entre las áreas quemadas y no quemadas. En particular, se observó que el porcentaje de arena fue mayor en el área no quemada, alcanzando un promedio del 70%, en comparación con el 58% en el área quemada. Este cambio se acompaña de una variación notable en el contenido de limo, que mostró un promedio del 18% en el área no quemada frente a un 20,5% en el área quemada. Asimismo, el contenido de arcilla también presentó diferencias marcadas, con un 12% en el área no quemada y un 21,5% en el área quemada. Cabe destacar que en las propiedades químicas el área no quemada presentó un contenido de materia orgánica de 33,05 % frente a 18,6 % en el área quemada, igual al carbono con 19,17cmol (+) /kg en el área no quemada frente a 10,78

col (+) /kg en el área quemada. El intercambio catiónico, que refleja la capacidad del suelo para retener nutrientes, también se encuentra en un nivel más alto en el área no quemada 15,41 cmol (+) /kg frente a 10,66 cmol (+) /kg. Por otro lado, el calcio en el área quemada muestra un incremento 0,57 cmol (+) /kg frente a 0,23 cmol (+) /kg en el no quemado, igual a magnesio que presentó un cambio leve, pasando de 0,51 cmol (+) /kg en el área no quemada a 0,57 cmol (+) /kg en el área quemada (Tabla 1)

Tabla 1.

Propiedades físicas y químicas del suelo en áreas afectadas y no afectadas por el incendio

IDENTIFICACIÓN MUESTRA		TEXTURA				%				cmol(+)/kg			mg/kg	
Código / Identificación Cliente		A%	L%	Ar%	CTx	pH	MO	CO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P
SP26455	No quemado 1	68	20	12	FA	4,3	49,87	28,93	15,4	0,19	0,53	0,32	16,44	2,48
SP26456	No quemado 2	58	20	22	FArA	4,4	15,84	9,19	9,2	0,16	0,17	0,22	9,75	5,03
SP26457	No quemado 3	66	22	12	FA	4,2	24,97	14,48	11,5	0,23	0,51	0,2	12,44	2,6
SP26458	No quemado 4	88	10	2	A	4	41,53	24,09	21,2	0,34	0,86	0,62	23,02	5,98
Promedio		70	18	12		4,22	33,05	19,17	14,33	0,23	0,52	0,34	15,41	4,02
D.E		12,75	5,416	8,16		0,17	15,45	8,96	5,25	0,08	0,28	0,19	5,77	1,76
SP26459	Quemado 1	66	12	22	FArA	4,3	27,4	15,89	15,6	0,38	0,7	0,27	16,95	3,21
SP26460	Quemado 2	38	26	36	FAr	4,5	13,85	8,03	7,1	0,96	1,1	0,23	9,39	3,61
SP26461	Quemado 3	58	26	16	FA	4,5	9,81	5,69	4,3	0,15	0,08	0,1	4,63	2,45
SP26462	Quemado 4	70	18	12	FA	4	23,34	13,54	10,7	0,29	0,4	0,31	11,7	5,39
Promedio		58	20,5	21,5		4,32	18,6	10,79	9,43	0,445	0,57	0,23	10,67	3,67
D.E		14,24	6,81	10,50		0,20	7,07	4,10	4,23	0,31	0,38	0,08	4,43	1,08

5.2 Composición florística por parcela

Los resultados indican que el número máximo de familias registradas en las parcelas fue de ocho (parcela 6 del área no quemada). Asimismo, se identificaron hasta ocho géneros diferentes. En cuanto a las especies, se registraron hasta nueve especies diferentes. Finalmente, el conteo total de individuos alcanzó un máximo de 28, esto según lo registrado en la parcela ocho del área no quemada (**Tabla 2**)

Tabla 2.

Familias, géneros especies e individuos por parcela. Q (quemado); NQ (no quemado)

Parcela	Q/NQ	#.familias	#.géneros	#.especies	#.individuos
1	NQ	5	6	6	17
2	NQ	6	8	8	18
3	NQ	4	6	6	26
4	NQ	6	8	8	17
5	NQ	6	8	8	18
6	NQ	8	9	9	18
7	NQ	4	5	5	18
8	NQ	3	7	7	28
9	NQ	5	6	7	17
10	NQ	4	5	6	14
11	NQ	5	7	8	17
12	NQ	4	4	4	12
13	Q	4	4	4	11
14	Q	5	6	6	13
15	Q	4	5	5	14
16	Q	3	4	4	14
17	Q	6	6	6	13
18	Q	4	7	7	15
19	Q	6	7	7	12
20	Q	5	6	6	14

21	Q	5	5	5	10
22	Q	5	7	7	16
23	Q	4	4	4	11
24	Q	7	8	8	18

5.3 Composición florística por familia

Muestra los resultados de diversidad biológica observada por familias. La familia Poaceae destaca notablemente, siendo la más representativa con un total de 134 individuos. Además, esta familia presenta el mayor número de especies y géneros. En segundo lugar, la familia Asteraceae también muestra una representación significativa con 114 individuos, cinco especies y cuatro géneros. Por otro lado, la familia Hypericaceae presenta un número menor de individuos (32) así como dos especies y un solo género.

Tabla 3.

Número de familias, géneros especies e individuos por familia

Familia	#.géneros	#.especies	#. individuos
Poaceae	5	5	134
Asteraceae	4	5	114
Hypericaceae	1	2	32
Cyperaceae	2	2	27
Rosaceae	3	3	18
Bromeliaceae	1	1	14
Rubiaceae	1	2	13
Cladoniaceae	1	1	12

Scrophulariaceae	1	1	7
Orobanchaceae	2	2	5
Lycopodiaceae	1	1	2
Ericaceae	1	1	1
Melastomataceae	1	1	1
Selaginellaceae	1	1	1

5.4 Diversidad alfa

El índice de Margalef para el área quemada muestra un promedio de 1,83, lo que indica una diversidad moderada, mientras Simpson presentó un valor de 0,78 tendiendo a una alta diversidad. Por otro lado, en el área no quemada, el índice de Margalef alcanza un valor más alto de 2,02 (indicando una mayor diversidad que en el área quemada), mientras Simpson se mantiene en 0,78. Índices de diversidad alfa entre parcelas . Q (quemado); NQ (no quemado)

Tabla 4.

Número de individuos Quemado- No quemado

Parcela	Q/NQ	Simpson	Shannon	Margalef	Cociente de mezcla
1	Q	0,71	1,29	1,25	0,36
2	Q	0,79	1,67	1,95	0,46
3	Q	0,73	1,43	1,52	0,36
4	Q	0,70	1,29	1,14	0,29
5	Q	0,77	1,61	1,95	0,46
6	Q	0,76	1,68	2,22	0,47
7	Q	0,79	1,75	2,41	0,58
8	Q	0,81	1,71	1,89	0,43

9	Q	0,97	1,47	1,74	0,50
10	Q	0,82	1,82	2,16	0,44
11	Q	0,69	1,26	1,25	0,36
12	Q	0,84	1,94	2,42	0,44
Promedio		0,78	1,58	1,83	0,43
1	NQ	0,77	1,60	1,76	0,35
2	NQ	0,86	2,03	2,42	0,44
3	NQ	0,69	1,42	1,53	0,23
4	NQ	0,83	1,91	2,47	0,47
5	NQ	0,83	1,91	2,42	0,44
6	NQ	0,85	2,04	2,77	0,50
7	NQ	0,64	1,27	1,38	0,28
8	NQ	0,70	1,52	1,80	0,25
9	NQ	0,83	1,84	2,12	0,41
10	NQ	0,80	1,67	1,89	0,43
11	NQ	0,84	1,96	2,47	0,47
12	NQ	0,74	1,36	1,21	0,33
Promedio		0,78	1,71	2,02	0,38

5.5 Categoría de amenaza

Se observa que un número significativo de las especies registradas se clasifican como "No evaluadas (NE)" según la categoría de amenaza de la UICN, sin embargo, *Espeletia conglomerata* A.C.Sm., se clasifica como "En Peligro Crítico", mientras que *Hypericum goyanesii* Cuatrec., se clasificada "En Peligro".

Tabla 5.

Categoría de amenaza de las especies registradas

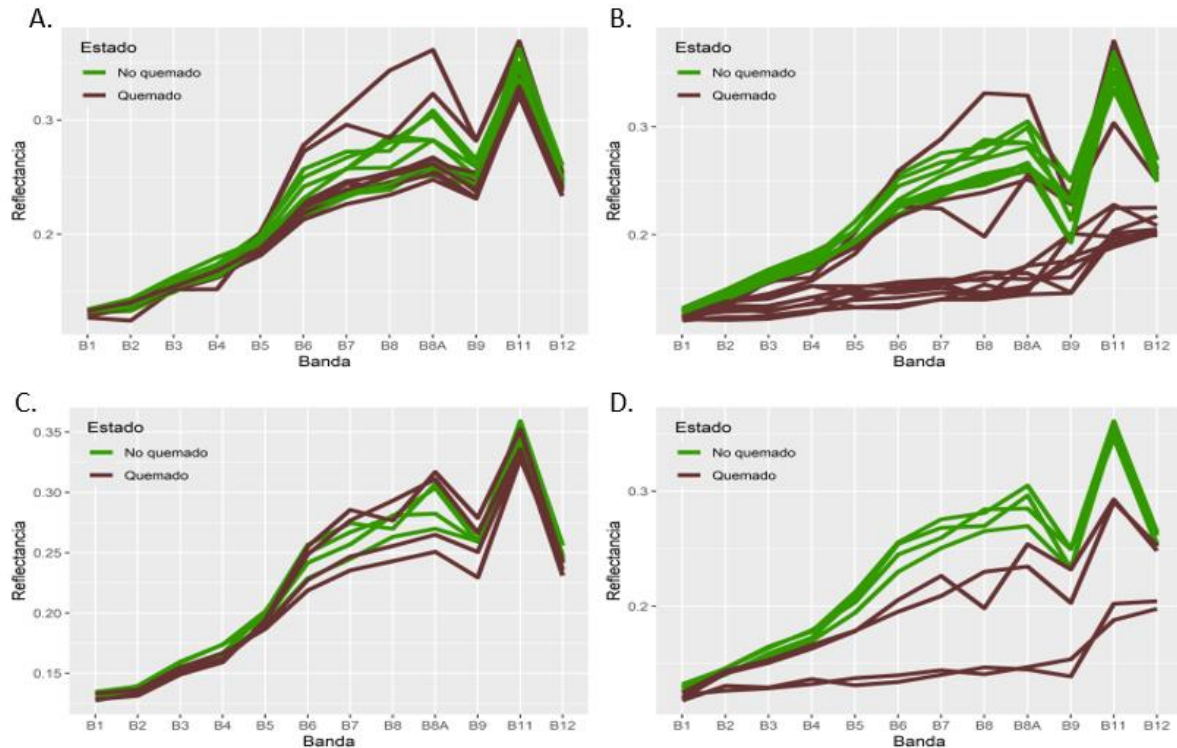
Familia	Nombre científico	Nombre común	Distribución	Categoría amenaza	Fuente
		Cenicita			
	<i>Asteraceae sp</i>	lanciolada			
	<i>Baccharis tricuneata</i> (L.fil.) Pers.	Mosca de páramo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Asteraceae	<i>Espeletia conglomerata</i> A.C.Sm.	Frailejón aglomerado	Endémica	En peligro crítico (CR)	UICN
	<i>Espeletia sclerophylla</i> Cuatrec.	Frailejón amarillo	Endémica	Vulnerable (VU)	UICN
	<i>Linochilus rosmarinifolius</i> Benth.	Romero de páramo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Bromeliaceae	<i>Puya goudotiana</i> Mez	Cardón	Endémica	Vulnerable (VU)	UICN
	<i>Cladonia mediterranea</i> P.A.Duvign. & Abbayes	Musgo blanco	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Cyperus rotundus</i> L	Cortadera	Endémica	Preocupación menor (LC)	UICN
Cyperaceae	<i>Isolepis cernua</i> (Vahl) Roem. & Schult.	Escirpillo cabizbajo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Ericaceae	<i>Vaccinium sp</i>	Fruto baya- hoja verde			
Hypericaceae	<i>Hypericum goyanesii</i> Cuatrec.	Guardarrocío	Endémica	En peligro (EN)	UICN

	<i>Hypericum juniperinum</i> (L.fil.) Kunth	Chite	Endémica	Vulnerable (VU)	UICN
Lycopodiaceae	<i>Lycopodium clavatum</i> L.	Licopodio corredor	Endémica	Preocupación menor (LC)	UICN
Melastomataceae	<i>Castratella piloselloides</i> (Bonpl.) Naudin	Hierba de oso	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Orobanchaceae	<i>Bartsia pedicularoides</i> Benth	Hoja de bolita	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Castilleja fissifolia</i> L.fil.	Flor de campo	Endémica	Vulnerable (VU)	UICN
	<i>Bryophyta sensu stricto</i>	Musgo verde	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Calamagrostis effusa</i> (Kunth) Steud.	Paja de páramo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Poaceae	<i>Chusquea tessellata</i> Munro	Chusque de Páramo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Holcus lanatus</i> L.	Pasto saboya	Endémica	Preocupación menor (LC)	UICN
	<i>Paspalum hirtum</i> Kunth	Pasto de corona	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Acaena cylindristachya</i> Ruiz & Pav.	Cadillo	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
Rosaceae	<i>Alchemilla aphanoides</i> Mutis	Hierba de la Hinchazón	Endémica	No evaluado (NE)	UICN
	<i>Lachemilla orbiculata</i> (Ruiz & Pav.) Rydb.	Oreja de ratón	Endémica	No evaluado (NE)	UICN

7	NQ	545,00	87,68	45,12	(±5,56)	-	44,76	7200
8	NQ	1016,44	360,31	22,28	-	133,88	80,91	11.200
9	NQ	-	-	32,52	(±9,34)	107,88	15,27	6400
10	NQ	-	-	35,26	(±6,54)	138,43	15,84	5600
11	NQ	3,00	0,57	39,17	(±2,29)	99,17	80,35	6800
12	NQ	4,60	2,19	-	-	43,47	6,44	4800
1	Q	301,00	-	17,63	(±2,61)	91,53	80,05	4400
2	Q	282,00	-	15,43	(±1,00)	151,87	33,70	5200
3	Q	308,00	-	17,81	(±5,84)	72,80	27,94	5600
4	Q	6,70	0,57	18,05	(±3,18)	150,03	82,78	5600
5	Q	4,33	0,45	17,28	-	76,40	77,37	5200
6	Q	76,83	175,47	-	-	44,10	13,40	6000
7	Q	-	-	-	-	-	-	4800
8	Q	266,58	176,96	-	-	60,90	10,02	5600
9	Q	380,50	60,10	-	-	54,70	33,23	4000
10	Q	4,20	-	22,36	(±10,33)	153,80	101,09	6400
11	Q	-	-	-	-	-	-	4400
12	Q	458,50	47,25	-	-	65,88	6,44	7200

5.7. Firmas espectrales

En la Figura. 2, se muestran las firmas espectrales de los sitios donde se realizó la caracterización de la vegetación (fila superior) y la toma de muestras de suelo (fila inferior). Se evidencia en general, que en los sitios no quemados la vegetación tuvo valores de reflectancia más altos que en los sitios quemados, en el momento inmediatamente después del incendio (05 de febrero de 2019), sobre todo a partir de la banda 3 (B3) en adelante. Sin embargo, resaltan algunos sitios dentro del área quemada, que no demostraron un cambio drástico con relación a la reflectancia previa al incendio.

Figura. 2*Firmas espectrales en los sitios quemados y no quemados*

Nota: Representación de diferencias entre parcelas y muestras de suelos en las dos fechas antes (01-01-2019) y después (05-02-2019): A. Parcelas (01-01-2019), B. Parcelas (05-02-2019), C. muestras de suelos (01-01-2019), D. muestras de suelos (05-02-2019).

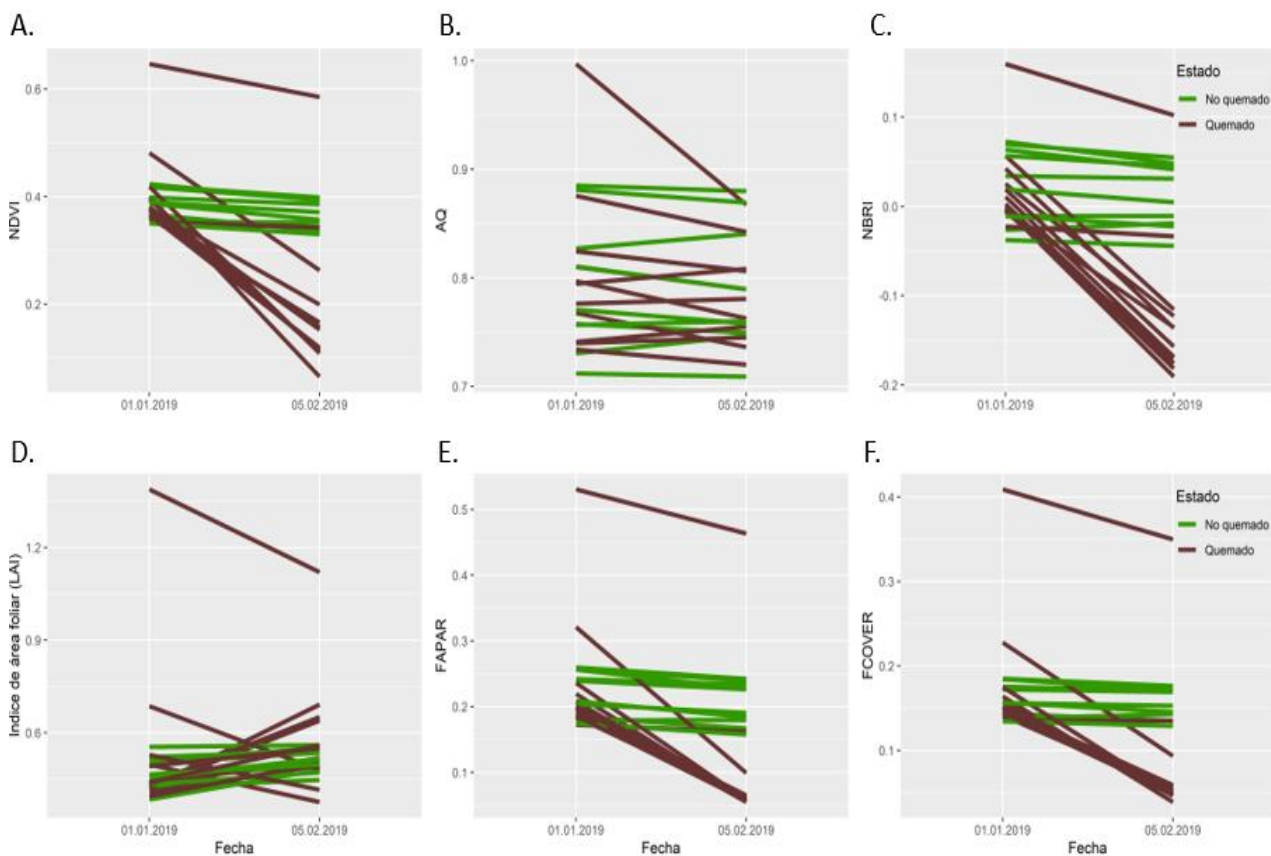
5.8. Índices espectrales y parámetros biofísicos

La Figura 3 presenta los tres índices espectrales en la línea superior y en los tres parámetros biofísicos en la fila inferior, en donde se aprecia el cambio de una fecha a la otra para las áreas quemadas y no quemadas. Entre los índices espectrales, destacan el Índice de vegetación normalizado (NDVI) y el NBRI mostrando que los valores se mantienen estables en las parcelas no quemadas, a diferencia de las parcelas quemadas, donde los cambios en los valores son significativos. Esto con excepción de la parcela 2 del área quemada, la cual presentó valores más altos en general y una variación menor de una fecha a

otra. Por otro lado, los parámetros biofísicos indican que el FAPAR y el FCOVER resaltan las diferencias entre las áreas quemadas y no quemadas, evidenciando su utilidad en la evaluación del impacto del fuego en la vegetación. Aunque los valores del NDVI se mantuvieron entre 0,3 y 0,5 para los sitios no quemados, la mayoría de los sitios afectados por el incendio tuvieron valores por debajo de 0,3. En el caso del NBRI los valores de los sitios no quemados no estuvieron por debajo de 0,05 en ninguna de las dos fechas estudiadas.

Figura. 3

Índices espectrales y parámetros biofísicos en los sitios quemados y no quemados



Nota: Representación de diferencias entre índices espectrales y parámetros biofísicos antes y después del incendio: A. Índice de vegetación normalizado (NDVI), B. Área quemada (AQ), C. Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI), D. Índice de área foliar (LAI), E. Fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR), F. Fracción de cobertura vegetal (FCOVER).

6. Discusión

Los páramos son considerados ecosistemas estratégicos en especial por su papel en la regulación del ciclo hidrológico que sustenta el suministro de recurso hídrico para consumo humano y desarrollo de actividades económicas de la población. Además de su alta riqueza biológica, estos territorios se caracterizan por su alta diversidad sociocultural, circunstancias que han despertado un especial interés por su conservación y manejo sostenible (Guimarães, 2001).

Los resultados obtenidos muestran un impacto significativo del incendio sobre la calidad del suelo, evidenciado cambios en el contenido de materia orgánica, el carbono y la capacidad de intercambio catiónico. En las áreas no quemadas, el contenido de materia orgánica alcanzó un 33,05, mientras que en el área quemada se redujo a 18,6 (56,3%). Esto sugiere que los incendios pueden afectar negativamente la estructura del suelo, lo que a su vez puede llevar a una disminución en la fertilidad de este (Caon, 2014). El contenido de carbono y el intercambio catiónico mostraron tendencias similares, lo que refuerza

la idea de que el fuego altera las propiedades físicas y químicas del suelo, limitando su capacidad para retener nutrientes necesarios para la vegetación (Palacios Sacoto & Condo, 2025). Sin embargo, el incremento de calcio en el área quemada podría estar relacionado con la liberación de este elemento durante la combustión, sugiriendo una dinámica compleja en la respuesta del suelo a los incendios (Montalvo & Hilario, 2020).

Los hallazgos indican que la diversidad biológica en las parcelas fue notable, con un máximo de ocho familias y nueve especies registradas en el área no quemada. Este dato es relevante, ya que se obtuvo que las áreas no afectadas por el fuego pueden mantener una mayor riqueza de especies (Pausas, 2018). La alta abundancia observada, especialmente en la parcela ocho con 28 individuos, resalta la importancia de las áreas no quemadas como refugios de biodiversidad, lo que podría ser fundamental para la recuperación de ecosistemas tras eventos de incendios (Gomez, 2018).

Los resultados de la Tabla 3 sobre diversidad de familias y géneros, muestra que la familia Poaceae fue la más representativa, con 134 individuos, lo que indica su adaptabilidad y predominancia en el hábitat

estudiado. Además, la familia Asteraceae con 114 individuos, también representa una parte significativa de la diversidad, sugiriendo que estas familias son esenciales para la estabilidad del ecosistema en áreas no quemadas (Cuesta et al., 2014). En contraste, la menor representación de Hypericaceae puede indicar una mayor vulnerabilidad de esta familia a las perturbaciones, lo que podría requerir medidas de conservación específicas (Uddin et al., 2013).

Los índices de diversidad calculados, como Margalef y Simpson, ofrecen una perspectiva sobre la salud del ecosistema. En el área quemada, el índice de Margalef fue de 1,83 indicando una menor diversidad al área no quemada (2,02), mostrando una mayor riqueza y diversidad de especies, igual a lo reportado por (Quezada, 2024). El índice de Simpson se mantuvo en 0,78 para ambas áreas (quemado y no quemado), lo que podría indicar una dominancia de ciertas especies en el ecosistema, lo que puede ser un signo de alteración en la dinámica natural del mismo (Li et al., 2021).

El análisis de firmas espectrales demostró que la vegetación sana tiene valores de reflectancia más altos en las bandas del espectro visible (B2, B3, B4), en las bandas de red edge (B5, B6, B7), infrarrojo cercano (B8), lo que se correlaciona con un estado óptimo de salud vegetal (Gitelson et al., 2006), y en el infrarrojo de onda media (B10, B11, B12). A diferencia de las zonas afectadas por el incendio en donde los valores de reflectancia disminuyeron significativamente a partir de la banda 3 (Verde). Por lo tanto, el monitoreo de las firmas espectrales puede ser una herramienta eficaz para la evaluación de la salud de los ecosistemas y la gestión de recursos naturales (Salgado Rodríguez, 2023).

Los resultados permitieron comprobar que el índice NVDI es particularmente sensible a las variaciones en la cobertura vegetal, ya que muestra estabilidad en las parcelas no quemadas y cambios significativos en las quemadas, lo que coincide con hallazgos previos que destacan su efectividad para monitorear la salud de la vegetación (Pettorelli et al., 2014). La excepción observada en la parcela 2 propone que factores como la distancia y la heterogeneidad del paisaje pueden influir en la respuesta aparente de la vegetación al fuego, un aspecto que ha sido abordado en estudios sobre la resiliencia ecológica post-incendio (Keeley et al., 2009). En cuanto a los parámetros biofísicos, aunque los cambios

son menos evidentes, el índice FAPAR tuvo la capacidad de diferenciar entre áreas quemadas y no quemadas, respaldando su uso en la evaluación de la fotosíntesis y el estado del dosel vegetal (García et al., 2018). Estos resultados enfatizan la relevancia de utilizar múltiples índices para obtener una evaluación rápida e integral del impacto del fuego en la vegetación, contribuyendo a la identificación y al entendimiento de los procesos ecológicos en ecosistemas claves, como los páramos, afectados por incendios.

Finalmente, el análisis de las variables estructurales revela diferencias marcadas en la densidad de individuos entre las parcelas. La parcela 8 en el área no quemada mostró la mayor densidad con 11.200 individuos/ha, lo que puede estar relacionado con condiciones óptimas de crecimiento y diversidad (García et al., 2020). Por el contrario, la parcela 9 en el área quemada presentó la menor densidad con solo 4000 individuos/ha, lo que resalta el impacto negativo que el fuego puede tener en la estructura poblacional de las comunidades vegetales (Miller et al., 2019).

7. Conclusiones

El estudio realizado ha mostrado evidencia clara sobre el impacto del incendio en la calidad del suelo y la biodiversidad de los ecosistemas evaluados. En primer lugar, se ha demostrado que los incendios afectan negativamente la calidad del suelo, disminuyendo de esta manera el contenido de materia orgánica y carbono, lo que afecta en la fertilidad y capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales. Esta alteración en las propiedades físicas y químicas del suelo resalta la necesidad de entender mejor la dinámica del suelo post-incendio.

Además, se ha observado que las áreas no quemadas tienen una mayor diversidad biológica, lo que las convierte en refugios cruciales para la biodiversidad. La riqueza de especies en estas áreas resalta su importancia para la recuperación de ecosistemas después de incendios, lo que indica que la conservación de estos espacios es vital para mantener la salud del ecosistema.

La diversidad de familias y géneros en las parcelas estudiadas ha revelado que ciertas familias, como Poaceae y Asteraceae, son predominantes, lo que indica su adaptabilidad y papel clave en la estabilidad del ecosistema. Por otro lado, la menor representación de otras familias da a entender que podrían ser más vulnerables a perturbaciones, lo que requiere atención en términos de conservación.

Los índices de diversidad obtenidos también reflejan la salud del ecosistema, mostrando una menor diversidad en las áreas quemadas en comparación con las no quemadas. Esto deja ver una posible dominancia de especies específicas, lo que podría ser un signo de alteración en la dinámica natural de estos ecosistemas.

Los índices espectrales como el NDVI y el NBRI, son útiles para la detección de las zonas afectadas por el incendio, además los parámetros biofísicos como la fracción absorbida de la radiación fotosintéticamente activa (FAPAR) y la cobertura vegetal (FCOVER) estimados a partir de imágenes de Sentinel-2, demostraron ser de ayuda para la caracterización e identificación del disturbio.

Finalmente, el análisis de las variables estructurales ha mostrado diferencias significativas en la densidad de individuos entre las parcelas, destacando el impacto negativo del fuego en la estructura poblacional de las comunidades vegetales. Estos hallazgos enfatizan la importancia de implementar estrategias de manejo y conservación que promuevan la recuperación de áreas afectadas por incendios, dejando segura así la preservación de la biodiversidad y la calidad del suelo en los ecosistemas estudiados.

8. Recomendaciones

Se recomienda promocionar Prácticas de Manejo Sostenible en el área de estudio, esto incluye la reforestación con especies nativas que sean resilientes al fuego y que contribuyan a la recuperación de la calidad del suelo. Además, se pueden establecer programas de monitoreo para observar la evolución del suelo y la vegetación a lo largo del tiempo.

Por otro lado, teniendo en cuenta que las áreas no quemadas presentan una mayor diversidad biológica, es crucial establecer políticas de conservación que protejan estos espacios. Se recomienda la creación de reservas naturales o corredores biológicos que conecten estos refugios, facilitando el movimiento de especies y promoviendo la salud del ecosistema.

También se sugiere que es de gran importancia llevar a cabo estudios adicionales que profundicen en la relación entre las especies vegetales, la estructura de la vegetación y las características del suelo con los índices de vegetación y la información capturada a partir de sensores remotos. Con el fin de identificar aquellas zonas, géneros, familias y tipos de crecimiento más vulnerables, ayudando a priorizar acciones de conservación y restauración.

Además, es vital fomentar programas educativos que sensibilicen a las comunidades locales sobre la importancia de la biodiversidad y el suelo. Informar sobre las consecuencias de los incendios y cómo contribuir a la protección del entorno puede dejar ver aspectos positivos respecto al cuidado que deben realizar las personas con el entorno.

Referencias bibliográficas

- Aguirre-Salado, C.A., J.R. Valdéz-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H.M. de los Santos-Posadas, y A.I. Aguirre-Salado (2011). Mapeo del Índice de Área Foliar y Cobertura Arbórea Mediante Fotografía Hemisférica y Datos SPOT5 HRG: Regresión y K-NN. *Agrociencia*. 45: 105-119
- Austin, M. (1917). A comparative analysis of remote sensing methods for burn-scar mapping in wetlands (Doctoral dissertation).
- Ávila-Vélez, E.F. (2020). Propuesta metodológica para cuantificar áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Caso de estudio páramo del Almorzadero, Colombia. *UD y Geomática*, (15), 25-32 DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.15260>
- Baev, P. V. & Penev, L. D. (1995). BIODIV: Program for Calculating Biological Diversity Parameters. Pensoft
- Beniston, M. (2003). Climate Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climate Change* 59:5-31.
- Caldera Fernández, J. D. (2023). Comparación de estudios paleoambientales de alta resolución e investigaciones en yacimientos arqueológicos para los últimos 3000 años (Holoceno tardío) en los páramos de Belmira y Frontino, la cuenca media de los ríos Porce y Cauca y la zona de Caño Rabón en el San Jorge (Colombia).
- Camargo-García, J. C., Dossman, M. Á., Rodríguez, J. A., Arias, L. M., & Galvis-Quintero, J. H. (2012). Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica*, 61(2), 151-165.
- Caon, L. (2014). Erosión y manejo post-incendio
- Clemente Quezada, J. A. (2024). Estimación y evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Parque Nacional Cañón del Sumidero (Master's thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas).

- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L., De Bièvre, B., & Posner, J. (2014). Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. CONDESAN. Quito, Ecuador.
- di Pasquale, G. et al. (2008). Dinámica del carbono en páramos andinos. Revisión de literatura (citado en Academia.edu)
- Di Pasquale, G., Marziano, M., Impagliazzo, S., Lubritto, C., De Natale, A., & Bader, M. Y. (2008). The Holocene treeline in the northern Andes (Ecuador): first evidence from soil charcoal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(1), 17-34.
- Echeverry, J. R., & Leiton, M. (2020). Estrategias de restauración para el páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(3), 2018-2018.
- García, M., et al. (2018). Assessing the utility of FAPAR to evaluate vegetation dynamics. *Journal of Vegetation Science*, 29(5), 880-890.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Chivkunova, O. B. (2006). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 82(3), 613-620.
- Gómez-González, S. et al. (2018). Invasiones biológicas post-incendio en ecosistemas mediterráneos.
- González, P. (2017). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. In Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN, Chile.
- Gotelli, N. J., & Colwell, R. K. (2001). Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology letters*, 4(4), 379-391. <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>
- Guimarães, R. P. (2001). Fundamentos territoriales y biorregionales de la planificación. CEPAL.
- Hermitaño Montalvo, H. R., & Crisóstomo Hilario, X. B. (2021). Efecto de la quema de pastizales en las propiedades de los suelos en Huamancaca Chico. Huancayo. 2020.
- Hernández Vargas, O., Mancilla Villa, Ó. R., Palomera García, C., Olgún López, J. L., Flores

- Magdaleno, H., Can Chulim, Á., ... & Sánchez Bernal, E. I. (2020). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en dos cuencas tributarias del río Tuxcacuesco, Jalisco, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 689-701.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M Weiss, y F. Baret (2004). Methods for leaf area index determination. Part I. Theories, techniques and instruments. *Agric. Forest Meteorol.* 121, 19–35.
- Keeley, J. E., Pausas, J. G., Fotheringham, C. J., & Moritz, M. A. (2009). Fire as an ecological and evolutionary process. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 110-135.
- Lande, R. (1996). Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos*, 5-13.
- Li, B., Wang, Y., Tan, W., Saintilan, N., Lei, G., & Wen, L. (2021). Land cover alteration shifts ecological assembly processes in floodplain lakes: Consequences for fish community dynamics. *Science of the Total Environment*, 782, 146724.
- Li, M.-S. (2024). Proposal of *Paenimyroides marinum* (Song et al. 2013) comb. nov. to replace the illegitimate name *Paenimyroides aquimaris* (García-López et al. 2020) Zhang et al. 2023. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 74(9).
- Llambí, L. D., Cuesta, F., & Hofstede, R. (2012). La importancia de la preservación de los ecosistemas de páramo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(140), 21-34. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8614325.pdf>
- Lloret, (2009). Efectos de los incendios en la vegetación y el ciclo hidrológico.
- Lopez Rozo, L. P., Parra Cuestas, K. J., & Vasquez Leyva, D. A. (2018). Estudio del desarrollo turístico sostenible del PNN Chingaza por medio de la población local, tomando como referente parámetros para la elaboración de los indicadores de la OMT.
- Magurran, A. E., & Magurran, A. E. (1988). Diversity indices and species abundance models. *Ecological diversity and its measurement*, 7-45.

MappingGIS. (2020). Los 6 Índices de Vegetación para completar el NDVI.

<https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/>

Mataix-Solera, J. y Cerdà, A. (2009). Impacto de incendios forestales en propiedades edáficas

Miller, R. G., Tangney, R., Enright, N. J., Fontaine, J. B., Merritt, D. J., Ooi, M. K., ... & Miller, B. P.

(2019). Mechanisms of fire seasonality effects on plant populations. *Trends in ecology & evolution*, 34(12), 1104-1117.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2024) (s.f.). Páramos. Recuperado de

<https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>

Molina, A. M., López, L. F., & Villegas, G. I. (2005). Los sistemas de información geográfica (SIG) en la planificación municipal. *revista EIA*, (4), 21-31.

Montes, C. (2017). Percepciones de los servicios ecosistémicos del suelo de páramo. *SciELO*.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2709-36892023000200005.

Moreno, C. E., & Halffter, G. (2001). Spatial and temporal analysis of α , β and γ diversities of bats in a fragmented landscape. *Biodiversity & Conservation*, 10, 367-382.

Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., & Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1249-1261.

Myneni, R. (2015). Mod15a2h modis/terra leaf area index/fpar 8-day 14 global 500m sin grid v006.

Technical report, NASA EOSDIS Land Processes

DAAC. <https://doi.org/10.5067/modis/mod15a2h.006>.

Palacio,(2024) [las-comunidades-del-paramo-actores-centrales-para-su-cuidado-y-proteccion/](#).

Palacios Sacoto, V. M., & Patiño Condo, E. S. (2025). Desarrollo de prototipos para aislación térmica

hechos con fibras de carrizo y resina polimérica: Análisis de sus propiedades físicas y mecánicas.

Páramos. (2021, octubre 20). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

<https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>

- Paredes Paz, M. Á., & Sánchez Paredes, D. E. (2020). Propuesta de un Plan de Restauración en Áreas afectadas por Incendios de Origen Antrópico en Los Páramos del Parque Nacional Llanganates del Cantón Tungurahua (Bachelor's thesis, Universidad Estatal Amazónica).
- Paredes Paz, M. Á., & Sánchez Paredes, D. E. (2020). Propuesta de un Plan de Restauración en Áreas afectadas por Incendios de Origen Antrópico en Los Páramos del Parque Nacional Llanganates del Cantón Tungurahua (Bachelor's thesis, Universidad Estatal Amazónica).
- Patrício, J., Neto, J. M., Teixeira, H., Salas, F., & Marques, J. C. (2009). The robustness of ecological indicators to detect long-term changes in the macrobenthos of estuarine systems. *Marine Environmental Research*, 68(1), 25-36.
- Pausas, J. G. (2018). *Incendios forestales, encrucijada natural y social*. Academia de Ciencias Sociales y del Medio Ambiente de Andalucía
- Peet, R. K. (1974). The measurement of species diversity. *Annual review of ecology and systematics*, 5(1), 285-307.
- Pérez Quezada, J. (2021). Restauración del Santuario Quebrada de La Plata. Proyecto GEF Montaña
- Pettorelli, N., Lushai, G., & Sutherland, W. J. (2014). The role of remote sensing in wildlife conservation. *Biological Conservation*, 168, 193-198.
- Roa-García, M. C., & Brown, S. (2016). Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río Barbas (Quindío, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 117-135.
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Salgado Rodríguez, E. F. (2023). Monitoreo multitemporal del humedal Puglllohuma, perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), por medio de imágenes capturadas desde una

aeronave no tripulada de ala fija (UAV) (Bachelor's thesis). EPN.

Silva et al. (2021): Metodología de evaluación de severidad integrando trabajo de campo y teledetección,

Silva et al. (2021): Metodología para evaluación de severidad en campo

Sinergise, S. B. (n.d.-b). Normalized difference vegetation index. Sentinel Hub Custom Scripts. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndvi/>

Sinergise, S.-H. by. (s/f). BAIS2 (burned area index for Sentinel 2). Sentinel Hub Custom Scripts; Sentinel-Hub by Sinergise. Recuperado el 21 de marzo de 2024, de <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/bais2/>

Song, X. et al. (2017). Fracción de cobertura vegetal en modelos suelo-atmósfera. Citado en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792021000100120.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Ubeda, X., & Sarricolea, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146, 152-161.

Uddin, M. B., Steinbauer, M. J., Jentsch, A., Mukul, S. A., & Beierkuhnlein, C. (2013). Do environmental attributes, disturbances and protection regimes determine the distribution of exotic plant species in Bangladesh forest ecosystema. *Forest Ecology and Management*, 303, 72-80.

Vargas Ríos, O. (2011). Restauración ecológica: Biodiversidad y conservación. *Acta biológica colombiana*, 16(2), 221-246.

Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot-London* 11, 41-76.

Apéndices

Apéndice. A

Resultados del laboratorio muestras de suelos

IDENTIFICACION MUESTRA		TEXTURA			%					cmol(+)/kg			mg/kg	
Código	Identificación Cliente	A%	L%	Ar%	CTx	pH	MO	CO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P
SP26455	No quemado 1	68	20	12	FA	4,3	49,87	28,93	15,4	0,19	0,53	0,32	16,44	2,48
SP26456	No quemado 2	58	20	22	FArA	4,4	15,84	9,19	9,2	0,16	0,17	0,22	9,75	5,03
SP26457	Noquemado 3	66	22	12	FA	4,2	24,97	14,48	11,5	0,23	0,51	0,2	12,44	2,6
SP26458	No quemado 4	88	10	2	A	4	41,53	24,09	21,2	0,34	0,86	0,62	23,02	5,98
SP26459	Quemado 1	66	12	22	FArA	4,3	27,4	15,89	15,6	0,38	0,7	0,27	16,95	3,21
SP26460	Quemado 2	38	26	36	FAr	4,5	13,85	8,03	7,1	0,96	1,1	0,23	9,39	3,61
SP26461	Quemado 3	58	26	16	FA	4,5	9,81	5,69	4,3	0,15	0,08	0,1	4,63	2,45
SP26462	Quemado 4	70	18	12	FA	4	23,34	13,54	10,7	0,29	0,4	0,31	11,7	5,39

Apéndice. B .

Formato de campo toma de datos parcelas

Cambios en la flora y propiedades del suelo tras un incendio en el páramo del Almorzadero									
Fecha: 15-06-2021		Parcela: P111Q			Altitud: 3407m				
Coordenada X: 11-06° 49' 53.4"		Y: 11-072° 28' 43.9"							
Nº	Alt	Especie	DAC	DAR	Alt	Fr	EF	L	Observaciones
1		Frailejón Peludo	-	1322	180.3	-	B	A	buen estado
2	= 7		-	1473	177.5	-	B	A	
3		Frailejones peludo suelo	-	-	-	21	A	8.46	Frailejones pequeños distribuido en tab. parcela
4		Pajonal	-	-	-	31	A	8.50	
5		Cataderra	-	-	-	4	A	8.47	
6		Lunaria de pequeños	0.44	-	506	-	B	A	Olea ex-cucalifto
7	= 6		0.35	-	44.3	-	B	A	
8		Cataderra	-	-	-	4	-	B	
9		Pajonal	-	-	-	23	B	B	
10		musgo flos blanco	-	-	-	7	B	B	9.08
11	= 1		-	88.6	93	-	H	C	Frailejón caído
12		Cataderra	-	-	-	5	B	C	
13		Musgo duro	-	-	-	7	-	C	9.13
14	= 1		-	110.3	120.2	-	B	D	
15	= 1		-	131.4	160.3	-	H	D	
16		Pajonal	-	-	-	11	-	B	
17		Cataderra	-	-	-	6	B	D	

Observaciones:
Baño de caballo

Apéndice. C

Registro fotográfico, montaje de parcelas y recolección de muestras

Apéndice. D





