

# UCUENCA

**Universidad de Cuenca**

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**Determinación del stock de Carbono Orgánico y distribución espacial en los suelos de los valles de la microcuenca "Cuevas" páramo altoandino de Cancán, Azuay, Ecuador**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental


**Autores:**

Javier Mateo Minchalo Castillo

Mathias Sebastián Iñiguez Reyes

**Director:**

Marco Tulio Ramírez Matamoros

ORCID:  0000 – 0002 – 2253 – 456X

**Cuenca - Ecuador**

2025-02-10

## Resumen

La investigación determinó el almacenamiento y distribución del carbono orgánico en los suelos de los valles de la microcuenca “Cuevas” en el páramo del sur de Ecuador. Se analizaron 115 puntos, combinando muestreos en 26 sitios estratégicos y datos de estudios previos. Se utilizaron análisis de laboratorio y herramientas geoespaciales con interpolación IDW para estimar la densidad aparente (DA) y calcular el almacenamiento total de carbono en el suelo (TCS) en toneladas por hectárea (t/ha). Los resultados mostraron que la cobertura de almohadilla en los valles presentó mayores valores de TCS, con un máximo de 1447.31 t/ha, en comparación con 429.90 t/ha en pajonal. En los horizontes, el horizonte H de la almohadilla acumuló 64.20% más carbono que el horizonte A, contribuyendo con el 72.79% del carbono total en el suelo. La DA baja ( $<0.5 \text{ g/cm}^3$ ) favoreció la acumulación de carbono al aumentar la porosidad y retención de agua. Los primeros 30 cm de suelo almacenaron la mayor cantidad de carbono, destacando la importancia de la cobertura de almohadilla y las condiciones del páramo, como baja temperatura y alta humedad, que reducen la descomposición de materia orgánica. Estos hallazgos resaltan el papel de los páramos como sumideros de carbono y su relevancia en la mitigación del cambio climático, subrayando la necesidad de su conservación.

*Palabras clave del autor:* carbono orgánico, páramo, almacenamiento de carbono, servicios ecosistémicos, dinámica espacial, almohadilla, turbera



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

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

This study determined the organic carbon storage and spatial distribution in the soils of the "Cuevas" micro-catchment valleys in the southern Ecuadorian páramo. A total of 115 points were analyzed, combining 26 strategic sampling sites with 89 previous research data points. Laboratory analysis and geospatial tools using IDW interpolation estimated apparent density (AD) values, facilitating the calculation of Total Carbon Storage (TCS) in tonnes per hectare (t/ha). Results showed that cushion vegetation in valleys had higher TCS values, with a maximum of 1447.31 t/ha, compared to 429.90 t/ha in grassland soils. In soil horizons, the H horizon in cushion vegetation stored 64.20% more carbon than the A horizon, contributing 72.79% of the total soil carbon. Low AD values ( $<0.5 \text{ g/cm}^3$ ) favored carbon accumulation by increasing porosity and water retention. The first 30 cm of soil stored the highest carbon content, emphasizing the role of cushion vegetation and páramo conditions—low temperatures and high moisture—in slowing organic matter decomposition. These findings highlight the importance of conserving páramos as carbon sinks for climate change mitigation.

*Author Keywords:* organic carbon, páramo, carbon storage, ecosystem services, spatial dynamics, cushion vegetation, peatland



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>8</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>11</b>
1.1. Identificación del problema y justificación.....	12
1.2. Objetivos .....	13
1.2.1. Objetivo General.....	13
1.2.2. Objetivos Específicos.....	13
<b>2. Marco Teórico</b> .....	<b>14</b>
2.1. Conceptos Generales .....	14
2.1.1. Calentamiento global y cambio climático.....	14
2.1.2. Ciclo del Carbono .....	16
2.1.3. Carbono Orgánico .....	18
2.1.4. Relación Carbono Nitrógeno.....	19
2.1.5. Servicios Ecosistémicos Ambientales .....	20
2.1.6. Zona de recarga hídrica.....	21
2.1.7. Páramo.....	21
2.1.8. Topografía .....	22
2.1.9. Tipos de suelos .....	22
2.1.9.1. Andosoles.....	23
2.1.9.2. Histosoles.....	23
2.1.9.3. Leptosoles .....	24
2.1.9.4. Regosoles .....	24
2.1.10. Perfil de Suelo .....	25
2.1.11. Cobertura Vegetal .....	26
2.1.11.1. Pajonal .....	26
2.1.11.2. Almohadilla .....	27
2.1.11.3. Turbera.....	27
2.1.12. Almacenamiento de Carbono .....	28
2.1.13. Profundidad del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono ...	29
2.1.14. Actividades antrópicas que afectan a los suelos de páramo .....	29
2.2. Estado del Arte.....	31
<b>3. Metodología</b> .....	<b>34</b>
3.1. Área de Estudio.....	34
3.2. Determinación de los puntos de muestreo .....	36

3.3.	Muestreo de Suelo.....	38
3.4.	Procedimiento de Muestreo .....	39
3.5.	Medición de la profundidad del suelo y sus horizontes.....	39
3.6.	Transporte de las muestras al laboratorio .....	39
3.7.	Preparación de las muestras de suelo y ensayos de laboratorio .....	40
3.7.1.	Preparación y secado de las muestras .....	40
3.7.2.	Análisis químico del suelo.....	41
3.7.3.	Obtención de valores de densidad aparente .....	42
3.7.4.	Análisis de carbono en el suelo .....	43
3.7.5.	Análisis Estadístico .....	44
<b>4.</b>	<b>Resultados y Discusión .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en almohadillas de zona de valle .....	46
4.2.	Almacenamiento de carbono orgánico en función de la cobertura vegetal.....	48
	Resultados del test de Shapiro-Wilk .....	50
4.3.	Almacenamiento del carbono orgánico en horizontes del suelo en almohadillas de valles y su relación con la profundidad.....	52
	<b>Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>59</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>60</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>66</b>

**Índice de Tablas**

Tabla 1. Características físicas y químicas de muestras de suelo.....	44
Tabla 2. Resumen estadístico TCS vs Cobertura Vegetal .....	47
Tabla 3. Resumen estadístico para TCS vs Cobertura Vegetal por horizontes. ....	49
Tabla 4. Densidad Aparente de los horizontes por cobertura vegetal.....	51
Tabla 5. Resumen estadístico para %C en los horizontes H y A en cobertura de almohadillas. ....	52
Tabla 6. Densidad aparente en horizontes de almohadillas en zona de valles. ....	54

## Índice de figuras

Figura 1. Ciclo del Carbono .....	16
Figura 2. Estratificación de horizontes del suelo en paramos del sur del Ecuador.....	24
Figura 3. Área de estudio. ....	33
Figura 4. Diagrama de flujo determinación de los puntos de muestreo .....	35
Figura 5. Modelo de Elevación Digital (DEM) de la microcuenca Cuevas. ....	35
Figura 6. Distribución de las coberturas vegetales en la microcuenca .....	36
Figura 7. Puntos de Muestreo en almohadillas. ....	37
Figura 8. Mapa general de puntos analizados.....	37
Figura 9. Medición de la profundidad de los horizontes. ....	38
Figura 10. Diagrama de flujo preparación y secado de las muestras de suelo. ....	39
Figura 11. Secado de las muestras de suelo en el laboratorio. ....	39
Figura 12. Tamizaje y molido de muestras secas .....	40
Figura 13. Preparación de las muestras de suelo y etiquetado .....	40
Figura 14. Interpolación de la densidad aparente del horizonte A.....	42
Figura 15. Distribución espacial del carbono orgánico- zona de valle almohadilla.....	46
Figura 16. Carbono total en el suelo (t/ha) por Cobertura Vegetal.....	48
Figura 17. Comparación entre horizontes y cobertura vegetal .....	51
Figura 18. Porcentaje de contribución de los horizontes H y A al TCS de almohadillas. ....	53
Figura 19. Contenido de carbono orgánico en los horizontes H y A de almohadillas de valles. ....	53
Figura 20. Contenido total de carbono (%) vs Profundidad del suelo (cm) .....	54

### Dedicatoria

A lo largo de este camino, he tenido la fortuna de contar con personas excepcionales que han sido mi fortaleza e inspiración para alcanzar esta meta.

A mi madre, Diana, por su esfuerzo, motivación y apoyo incondicional en cada paso que he dado, siempre brindándome lo mejor. Este logro no solo refleja mi esfuerzo, sino también la perseverancia y los valores que me has inculcado. Mi padre, Javier, por los sabios consejos y por ser un ejemplo de que con determinación y constancia todo es posible.

A mi abuelita Susi, con su amor incondicional, sabiduría y valores ha sido una luz que me guía siempre. Gracias por estar presente en cada momento, apoyarme en cada decisión y motivarme a soñar en grande sin importar lo que pase.

A mis hermanos, que este logro les inspire a perseguir sus propios sueños con esfuerzo, confianza y la certeza de que todo es alcanzable.

A Mathias Iñiguez, amigo y compañero de tesis, quien no solo compartí largas horas de esfuerzo y dedicación, sino también una gran amistad llena de inolvidables experiencias fuera de la universidad. Este logro es el resultado del trabajo en equipo y de los momentos memorables durante este proceso.

A mis amigos, por su valiosa amistad y por ser parte de grandes aventuras que marcaron este camino. Su apoyo y compañía han hecho este trayecto mucho más especial y significativo.

Finalmente, este logro no es solo mío, sino de todos los que caminaron a mi lado, creyendo en mí y brindándome el apoyo para seguir adelante.

*Mateo Minchalo.*

### Dedicatoria

Este trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios y a mis padres.

Dios siempre supo darme la fortaleza para a pesar de las dificultades nunca rendirme.

A mis padres que me apoyaron incondicionalmente, y a pesar de todo siempre confiaron en mí, sin su paciencia, consejos, y amor, la consecución de este logro simplemente no hubiese sido posible, no me alcanzan las palabras para agradecerles todo lo que hacen por mí.

A mi abuela Marlene que más que mi abuela es mi segunda madre, incondicionalmente me apoyó en todo lo necesario, y desde siempre me cuidó.

A mis hermanos quienes son la amistad más sincera, bonita y verdadera que la vida me pudo dar, su compañía, apoyo y sinceridad día a día es un pilar fundamental en mi vida.

A mis amigos que son la familia que escogí, su apoyo y compañía ha sido esencial, en especial mi amigo Mateo Minchalo que fue mi compañero durante todos estos años de estudio, y también en la elaboración de este trabajo de titulación.

Cada una de las personas mencionadas en esta dedicatoria forman parte fundamental de mi vida y tienen un lugar especial en mi corazón. ¡Gracias!

*Mathías Iñiguez.*

### Agradecimientos

Lograr esta meta tan anhelada, no hubiese sido posible sin la ayuda de grandes personas que nos han acompañado a lo largo de este camino. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Marco Ramírez quien nos brindó un apoyo incondicional, gracias por su paciencia, dedicación, conocimientos y orientación durante el proyecto como director de tesis. También al Ing. Óscar Morales, Dr. Armando Molina, Prof. Veerle Vanacker y al Ing. Aleksandr Khachartyan, quienes contribuyeron con su experiencia y compromiso, haciendo posible la culminación exitosa de esta investigación.

Extendemos nuestra gratitud a las instituciones que apoyaron esta trabajo de integración curricular como son la Universidad de Cuenca (PROMAS) y la Universidad de Lovaina la Nueva (Bélgica) a través del Proyecto inter-universitario "Network of regional hubs working on "Soil-Water-Plant systems under Global Change", conjuntamente con el financiamiento de ARES (Académie de Recherche et D'Enseignement Supérieur) de Bélgica, quienes brindaron el apoyo logístico y económico para la ejecución de esta investigación.

Finalmente, este logro es el resultado del apoyo, confianza y colaboración de todas las personas y organizaciones que creyeron en nosotros. Nos llevamos aprendizajes y experiencias que nos inspiran a seguir adelante.

Gracias.

*Mateo Minchalo. y Mathias Iñiguez.*

## Introducción

Los páramos andinos representan ecosistemas estratégicos debido a su capacidad única para almacenar carbono orgánico en los suelos y regular los flujos hídricos (Pinos et al., 2021), desempeñando un papel crucial en la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad. El calentamiento global en los últimos 50 años se ha visto incrementado debido a los gases de efecto invernadero (GEI) como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NO<sub>x</sub> (Montalvo, 2021). Desde 1990 hasta 2019, las emisiones globales de gases de efecto invernadero aumentaron en más del 60%, en 2021 se registró emisiones de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 36.4 gigatoneladas a nivel mundial.

Es por esto que la ONU persiste en reducir las emisiones aproximadamente un 45% para 2030 mediante acuerdos internacionales como el Acuerdo de París (2015) y la COP 28 (2023), que tienen como objetivo disminuir las emisiones y limitar el aumento de la temperatura global a 1.5°C. Sin embargo, no han sido suficiente y se requiere aplicar medidas drásticas para reducir las emisiones globales.

La crisis climática global ha destacado la necesidad de explorar soluciones basadas en la naturaleza. Los páramos altoandinos, como los de Ecuador, desempeñan un papel decisivo en la regulación climática, la importancia ambiental de estos ecosistemas elevados y caracterizados por condiciones climáticas frías y húmedas influyen directamente en el almacenamiento de carbono, dado que los suelos desempeñan un rol importante en la mitigación del cambio climático (Burbano, 2018), ya que permite remover dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado en la atmósfera y almacenarlo en el ecosistema, especialmente en los suelos. Además, en estos ecosistemas predominan suelos como los Andosoles e Histosoles, que poseen una alta capacidad de almacenamiento de carbono. Los Andosoles estructurados por material volcánico, crean complejos de aluminio con materia orgánica y pueden almacenar entre 20% y 30% de su peso en carbono orgánico, mientras que los Histosoles de zonas saturadas tienen capacidades de almacenamiento entre 30% y 60% en la capa superficial, lo que contribuye a la retención de carbono, limitando la descomposición de la materia orgánica y favoreciendo su acumulación (Molina et al., 2019).

Estos suelos destacan por características como baja densidad aparente, saturación de agua, alto contenido de carbono, pH bajo y alta capacidad de manejo del agua (Ramírez & Cisneros, 2015). No obstante, la alteración de los ecosistemas debido a actividades antrópicas provoca la liberación de carbono almacenado, transformando los suelos en fuentes de GEI en lugar de sumideros de carbono. En este contexto, la presente investigación se enmarca dentro del Proyecto Network of Regional Hubs Working on “Soil-Water-Plant Systems Under Global Change”, financiado por ARES, en colaboración con la Universidad Católica de Lovaina

(UCL), la Universidad de Cuenca, la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y la ONG Fundación TerraCiencia.

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca "Cuevas", localizada en el páramo altoandino de Cancán, provincia del Azuay, Ecuador. Se realizaron muestreos de suelo en 26 puntos estratégicamente seleccionados, considerando criterios de cobertura vegetal y topográficos, enfatizando en zonas planas con vegetación de almohadilla. La ubicación de los puntos de muestreo se definió mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), en cada sitio, se recolectaron muestras de suelo utilizando un barreno de media caña, permitiendo determinar los horizontes (H, A, AC y CA) con sus profundidades respectivas, incluyendo las propiedades físicas relevantes de cada perfil.

Además, se utilizó una base de datos proporcionada por el proyecto "ParamoSus", que contenía información sobre el carbono orgánico y la densidad aparente de los horizontes del suelo en puntos de muestreo previamente evaluados en la misma microcuenca. Para aquellos sitios donde no se conocía la densidad aparente, se aplicó la técnica de interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), implementada en el software QGIS. Este método permitió estimar los valores, asignando mayor peso a los registros más cercanos al punto de interés.

La integración de la base de datos histórica y los resultados obtenidos mediante interpolación generaron una base de 115 datos representativos. Este amplio enfoque permitió analizar la distribución espacial del carbono orgánico y su almacenamiento, considerando la influencia de la cobertura vegetal y la profundidad del suelo,

En este sentido, la conservación y el manejo sostenible de los páramos resulta importante para mantener sus dinámicas ecológicas, biológicas, biodiversidad, etc. La protección de estos ecosistemas no solo garantiza el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático y brinda servicios ecosistémicos esenciales (Montalvo, 2021).

### **1.1. Identificación del problema y justificación**

La escasa información acerca de estos ecosistemas resulta preocupante, ya que el contenido de carbono en el suelo de páramo desempeña un rol crucial en el mantenimiento de la salud del ecosistema y en la regulación del clima a nivel regional (Montalvo, 2021).

En la microcuenca "Cuevas" del páramo alto andino, ubicado en la zona de Cancán, Sector Soldados, Azuay, Ecuador, no existe suficiente información sobre el contenido de carbono en los suelos en la zona de los valles, lo que dificulta la comprensión de los procesos ecológicos. Las actividades humanas, particularmente la degradación de los ecosistemas forestales ha impulsado el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Molina et al., 2015). Este

fenómeno puede generar impactos considerables en el balance global de carbono y, por lo tanto, potenciar el cambio climático (Pinos et al., 2021).

Los páramos son ecosistemas únicos y vitales que aportan una amplia gama de servicios ecosistémicos, esenciales para la vida en la Tierra y el bienestar humano. Es importante profundizar en el conocimiento de estos ecosistemas, considerando la relación entre el contenido de carbono, la topografía, la hidrología y la vegetación presente, especialmente en un contexto global de crecientes emisiones de (GEI) gases de efecto invernadero (Martínez & Silva, 2023), ya que la falta de información no solo obstaculiza la comprensión de los procesos ecológicos, sino que también limita la toma de decisiones para su manejo y conservación, especialmente en un contexto de degradación del ecosistema. En el caso de la microcuenca "Cuevas" el análisis del contenido de carbono orgánico adquiere una importancia crucial desde una perspectiva ambiental, ya que los suelos de esta región son fundamentales como servicio ecosistémico, estos actúan como esponjas naturales para el almacenamiento de carbono orgánico (Singh et al., 2024), y de agua, la cual liberan gradualmente durante los períodos de sequía, siendo crucial para regular los flujos de las cuencas hidrográficas desempeñando así un papel esencial en la mitigación del cambio climático.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Determinar el stock de carbono orgánico y su dinámica espacial en los suelos de los valles de una microcuenca de páramo.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Analizar la distribución espacial del carbono orgánico en los suelos de los valles con cobertura vegetal de almohadilla.
- Comparar el almacenamiento de carbono orgánico en la cobertura vegetal de almohadillas vs pajonal.
- Evaluar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en las almohadillas de los valles para los horizontes H y A, y su relación con la profundidad.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Conceptos Generales

#### 2.1.1. Calentamiento global y cambio climático

El calentamiento global y el cambio climático son términos que a menudo se usan de manera intercambiable, pero tienen diferencias importantes. El calentamiento global se refiere específicamente al aumento de la temperatura en el planeta, superficie marina y la acidificación del océano, mientras que el cambio climático abarca los impactos y las condiciones meteorológicas resultantes de este calentamiento (Paterson, 2017).

El cambio climático, por su parte, se manifiesta en fenómenos como precipitaciones más intensas, alteraciones en los patrones meteorológicos históricos y sequías. Desastres naturales como avalanchas, incendios forestales, huracanes y olas de calor también pueden ser atribuidos de la misma manera a este fenómeno (Paterson, 2017).

La medición de la temperatura atmosférica en estaciones meteorológicas ha permitido monitorear el calentamiento global en diferentes regiones del mundo desde finales del siglo XIX. Gracias a estos datos, se ha podido observar que la temperatura media global ha aumentado significativamente, entre 0.5°C a 1°C a lo largo de los años (González, 2019). Es evidente que los años más cálidos se concentran en las últimas décadas, es decir, desde 1980 hasta la fecha. Este calentamiento global se ha acompañado de un incremento en el CO<sub>2</sub> atmosférico, lo que sugiere que la causa de este calentamiento es un aumento del efecto invernadero (Olhoff et al., 2024).

La razón del aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera puede estar vinculada con procesos naturales, pero también por influencia humana significativa. La deforestación y quema de combustibles fósiles como el carbón y petróleo han incrementado el CO<sub>2</sub> atmosférico, intensificando el efecto invernadero y contribuyendo al calentamiento global.

Es difícil diferenciar el calentamiento global por causas naturales o humanas, pero las investigaciones realizadas por Burbano (2018), usando modelos climáticos los cuales consideran todas las posibles causas indican que solo al incluir la contribución de CO<sub>2</sub> por las actividades humanas se puede explicar la tendencia pronunciada al calentamiento observada especialmente en las últimas décadas (Olhoff et al., 2024).

Los efectos del calentamiento global ya son notables en nuestro planeta, siendo uno de los más claros el derretimiento de los glaciares, tanto en montañas como en los casquetes polares. Una consecuencia directa es el aumento gradual del nivel del mar, poniendo en

riesgo de inundaciones a las ciudades costeras (Sánchez, 2016). Otro efecto del calentamiento global es la alteración de los patrones climáticos, afectando cuándo y cuánto llueve en cada región, con implicaciones económicas y ecológicas. La agricultura será particularmente vulnerable al cambio climático, así como la salud, debido a cambios en la distribución de muchas enfermedades. Se ha observado que, en los últimos 400,000 años, el clima ha oscilado entre etapas frías (glaciares) y etapas cálidas (interglaciares). Estas fluctuaciones cíclicas, con una duración aproximada de 100,000 años, se han relacionado con los ciclos de Milankovitch, pequeñas variaciones en la orientación de la Tierra respecto al Sol (Martínez et al., 2008).

Estos ciclos también están asociados con cambios en el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, con menos CO<sub>2</sub> durante las fases glaciares y más aún durante las fases interglaciares. Actualmente, los niveles de temperatura y CO<sub>2</sub> atmosférico están alcanzando o superando los máximos de los últimos 400,000 años, siendo esencial controlar estas emisiones para evitar consecuencias climáticas impredecibles. Un cambio climático tan rápido e intenso como el actual podría ser el preludio de un nuevo recambio biológico, con posibles extinciones y migraciones importantes que afectarían a nuestra especie (Choque, 2021)

El cambio climático global se destaca como uno de los mayores desafíos ambientales a los que se enfrenta la humanidad debido al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O). Se espera que el impacto del cambio climático se siga intensificando en las próximas décadas, lo que genera una creciente preocupación a nivel mundial (Choque, 2021).

El calentamiento global en 2024 ha alcanzado niveles críticos, con temperaturas que han batido récords históricos y fenómenos climáticos extremos cada vez más frecuentes, se estima que el planeta podría experimentar un aumento de temperatura entre 2.6 y 3.1 °C para finales de siglo, superando el objetivo de limitar este incremento a 1.5 °C, como se estableció en el Acuerdo de París. Este calentamiento está estrechamente vinculado a la intensificación de eventos extremos como incendios forestales, tormentas, inundaciones y sequías, los cuales afectan tanto a poblaciones urbanas como rurales en diversas partes del mundo. Además, el fenómeno de El Niño, actualmente se ha exacerbado las condiciones cálidas, ha añadido presión a los ya elevados registros de temperatura global (Olhoff et al., 2024). En América Latina, el cambio climático está afectando de forma significativa, no lineal y heterogénea. Esto significa que sus impactos varían ampliamente entre diferentes sectores y regiones. En esta zona, se ve afectada la agropecuaria, la biodiversidad, los recursos hídricos, el nivel del mar, el turismo, los bosques, la salud y las áreas urbanas, con

proyecciones que indican un incremento exponencial en sus efectos a medida que sube la temperatura global (Choque, 2021).

El calentamiento global no es solo una amenaza para el futuro, sino una realidad actual que afecta a todos los habitantes del planeta. Esta crisis debe abordarse de manera inmediata, ya que, de no hacerlo, los daños al planeta podrían tornarse irreversibles, con consecuencias devastadoras como, inseguridad alimentaria, pobreza y destrucción de ecosistemas. La participación activa de gobiernos, empresas y ciudadanos en medidas de mitigación y adaptación es esencial para contrarrestar estos efectos y asegurar un ambiente saludable para las generaciones futuras (Choque, 2021).

### **2.1.2. Ciclo del Carbono**

El carbono (C) es el elemento principal de la química orgánica y desempeña un papel fundamental en la vida, los materiales y los procesos químicos que se producen en el planeta Tierra. Se encuentra en forma inorgánica en minerales y rocas, siendo esencial para los seres vivos gracias a su gran capacidad de combinarse con otros elementos. Esta característica permite la formación de moléculas complejas como proteínas, grasas, carbohidratos y ácidos nucleicos (Chinchilla et al., 2011).

El ciclo del carbono es un proceso biogeoquímico mediante el cual este elemento se intercambia entre los diversos reservorios del planeta: la atmósfera, océanos, biosfera terrestre y los sedimentos de la Tierra. Cumple un rol fundamental en el mantenimiento del equilibrio entre la cantidad de carbono, el clima y los seres vivos (Suárez et al., 2016). El carbono se encuentra principalmente en tres formas: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), carbono orgánico y carbonatos.

Los reservorios de carbono son sistemas naturales que almacenan y liberan carbono a lo largo del tiempo. Los principales reservorios son: 1) La atmósfera, que contiene carbono principalmente en forma de  $\text{CO}_2$  y metano ( $\text{CH}_4$ ); 2) Los océanos, que almacenan carbono disuelto, en forma de carbonatos y en la biomasa marina; 3) La biosfera terrestre, que incluye el carbono en la vegetación viva, la materia orgánica muerta y el suelo; y 4) La litosfera, que comprende los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y los sedimentos carbonatados (Carmona, 2017).

El ciclo del Carbono contiene interacciones que describe la dinámica del carbono entre estos distintos reservorios como la atmósfera, los océanos, las rocas, los seres vivos y el suelo. A continuación, se muestra la Figura 1 que representa el ciclo del carbono:

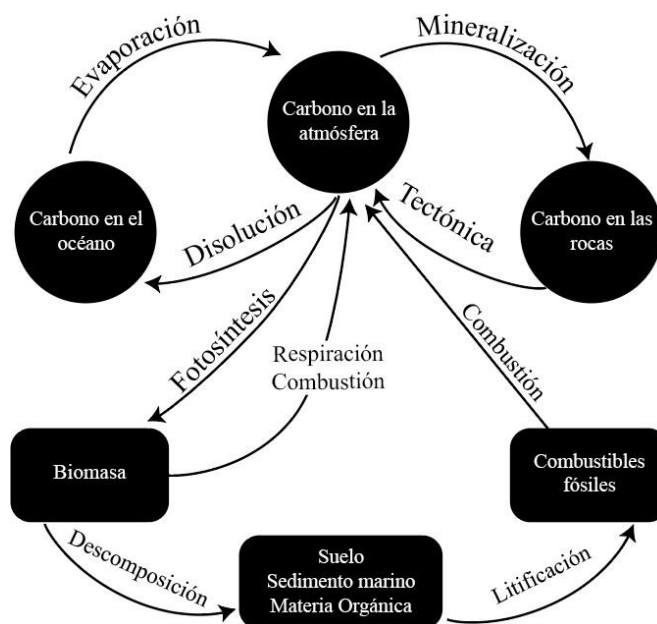


Figura 1. Ciclo del Carbono.

Fuente: (Harrison et al., 2003)

Nota: Las flechas indican flujos de carbono, los recuadros sumideros de carbono y los círculos productos del ciclo de carbono.

En la atmósfera, el carbono se presenta como  $\text{CO}_2$  y es absorbido por las plantas a través de la fotosíntesis, convirtiéndose en biomasa. Al morir las plantas, parte de su carbono orgánico se transfiere al suelo, donde se almacena como materia orgánica, creando un reservorio de carbono en el suelo. Este carbono almacenado en el suelo es crucial, pues ayuda a mantener niveles de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera bajo control, contribuyendo así a mitigar el cambio climático. Además, a través de la descomposición y la actividad de los microorganismos, una fracción del carbono en el suelo puede volver a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  (Burbano, 2018).

El carbono también se acumula en otros reservorios naturales, como los océanos y las formaciones rocosas. En los océanos, el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua y se intercambia con la atmósfera, mientras que en las rocas se almacena mediante procesos de mineralización y actividad tectónica. Con el tiempo, parte del carbono del suelo puede transformarse en combustibles fósiles, que, al ser quemados, devuelve  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, cerrando el ciclo. De esta manera, el suelo es clave en el ciclo del carbono global, ya que su capacidad para retener carbono orgánico afecta directamente la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y contribuye al equilibrio del clima terrestre.

Estos reservorios interactúan continuamente a través de varios procesos naturales, como la fotosíntesis vegetal, la respiración de los seres vivos, la descomposición de la materia

orgánica y la sedimentación del carbono en el lecho marino (Burbano, 2018). Estos fenómenos contribuyen a regular la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y a mantener el clima en la Tierra. Sin embargo, las actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, están alterando este ciclo al incrementar la presencia de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Este aumento contribuye al calentamiento global y al cambio climático, lo que pone en riesgo el delicado equilibrio que el ciclo del carbono ha mantenido durante millones de años. La alteración de los reservorios naturales, como la deforestación y la degradación de los suelos, también afecta significativamente al ciclo del carbono, reduciendo la capacidad de estos sistemas para almacenar y regular el carbono atmosférico (EPA, 2024).

El ciclo del carbono en los suelos de los páramos altoandinos del Ecuador tiene una importancia crucial para el ecosistema y el clima global. Estos suelos, caracterizados por su alta capacidad de almacenamiento de carbono orgánico, actúan como sumideros naturales de CO<sub>2</sub> atmosférico, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático (Castañeda & Montes, 2017). La acumulación y conservación de grandes cantidades de carbono en la materia orgánica del suelo es la principal función de este ciclo en los páramos, favorecido por las bajas temperaturas y la alta humedad que ralentiza la descomposición.

Esta acumulación no solo ayuda a regular el clima, sino que también mejora la estructura del suelo, aumenta su capacidad de retención de agua y nutrientes que sostienen la biodiversidad única de estos ecosistemas (Pinos et al., 2021). Los suelos de páramo juegan un papel vital en la regulación hídrica, actuando como "esponjas naturales" que almacenan y liberan agua gradualmente, lo que es fundamental para el abastecimiento de agua en las regiones andinas (Osorio, 2018). La preservación de estos ciclos del carbono en los páramos es esencial para mantener servicios ecosistémicos críticos y para la resiliencia frente al cambio climático en Ecuador y la región andina en general.

### **2.1.3. Carbono Orgánico**

El carbono en el suelo se encuentra en dos tipos de reservorios, estos son considerablemente grandes: uno es inorgánico y el otro orgánico (Burbano, 2018).

Es una parte crucial del ciclo global del carbono, representando el 69.8% del carbono orgánico de la biosfera. El carbono orgánico en el suelo (COS) influye en la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, las cuales están relacionadas con su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva (Martínez et al., 2008).

Representa casi dos tercios del carbono fijado en los ecosistemas terrestres, totalizando aproximadamente 1.5 gigatoneladas de carbono (Burbano, 2018). Esto convierte al suelo en

uno de los mayores reservorios de carbono en la naturaleza. Además de su función como almacén, el COS desempeña un papel esencial en la regulación del clima, la fertilidad del suelo y la biodiversidad del ecosistema.

En condiciones naturales, el carbono orgánico del suelo es el resultado del equilibrio entre la incorporación de material orgánico fresco y la liberación de carbono en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, así como por procesos de erosión y lixiviación. En suelos con condiciones aeróbicas, una parte significativa del carbono que entra al suelo (55 gigatoneladas C por año a nivel mundial) es lábil y se mineraliza rápidamente, mientras que una pequeña fracción se acumula como humus estable (400,000 toneladas C por año) (Martínez et al., 2008). El CO<sub>2</sub> liberado del suelo a la atmósfera no solo proviene de la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) a través de la actividad de la fauna edáfica y microorganismos, sino también del metabolismo de las raíces de las plantas.

El material orgánico muerto (principalmente en forma de residuos vegetales y exudados) es incorporado al suelo por la fauna del mismo, lo que conlleva la entrada de carbono en el suelo a través de la transformación del material orgánico por microorganismos heterótrofos (FAO, 2017).

El carbono orgánico del suelo (COS) es crucial en el ciclo del carbono y en la regulación del clima. Este carbono, presente en residuos orgánicos y humus, equilibra la incorporación de material orgánico y la emisión de CO<sub>2</sub>. En condiciones aeróbicas, gran parte del COS se mineraliza rápidamente, mientras que una fracción se acumula como humus estable. Una gestión adecuada del COS puede mitigar el cambio climático al reducir el CO<sub>2</sub> atmosférico (Burbano, 2018).

#### **2.1.4. Relación Carbono Nitrógeno**

La relación C/N es un parámetro que evalúa la calidad de los restos orgánicos en el suelo, indicando el nivel de mineralización de la materia orgánica presente. El carbono y el nitrógeno son esenciales para todos los procesos biológicos, directa o indirectamente. El carbono, capturado por la biomasa a través de la fotosíntesis desde el CO<sub>2</sub> atmosférico, generalmente constituye alrededor del 50-60% de la materia orgánica. Una relación C/N más baja indica una mayor mineralización de la materia orgánica y, por lo tanto, una mejor calidad del suelo (Amaguaya-Llamuca, 2015).

La relación C/N es un indicador de la calidad del sustrato orgánico del suelo, reflejando la disponibilidad de nitrógeno para las plantas. Valores altos indican una descomposición lenta de la materia orgánica, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, haciéndolo

inaccesible para las plantas (Gamarra-Lezcano et al., 2018). En cambio, valores entre 10 y 14 promueven una descomposición más rápida y eficiente, estimulando la actividad microbiana con suficientes nutrientes para microorganismos y plantas. La relación C/N menor a 15 para bacterias y hongos indica una mayor eficiencia en la descomposición de la materia orgánica (Gamarra-Lezcano et al., 2018).

En los suelos de páramos altoandinos la relación C/N puede ser más alta, favoreciendo a la descomposición de la materia orgánica, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la actividad microbiana (Gamarra-Lezcano et al., 2018). En estos suelos, una relación C/N ideal se sitúa generalmente entre 10 y 20 (Contreras & Fernández, 2021). En este rango, la descomposición de la materia orgánica ocurre de manera equilibrada, liberando gradualmente nutrientes esenciales para las plantas sin agotar rápidamente los recursos orgánicos disponibles. Este equilibrio es fundamental para mantener la fertilidad del suelo y promover la diversidad biológica característica de estos ecosistemas únicos.

### **2.1.5. Servicios Ecosistémicos Ambientales**

Los servicios ecosistémicos, son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, sean estos directos o indirectos, los cuales son de suma importancia para que se pueda desarrollar la vida. Estos incluyen la producción de alimentos y medicamentos, la regulación del clima y las enfermedades, la provisión de suelos fértiles y agua limpia, la protección contra desastres naturales, oportunidades de recreación, el mantenimiento del patrimonio cultural y beneficios espirituales (Avendaño et al., 2020).

Los servicios ecosistémicos se clasifican en cuatro grandes grupos, de acuerdo al beneficio que brindan y la necesidad que cubren, dicha clasificación se describe a continuación (Avendaño et al., 2020):

- i. Servicios de provisión: se refieren a los bienes y productos materiales que se obtienen de los ecosistemas, como alimentos, fibras, madera, leña, agua, suelo, recursos genéticos, petróleo, carbón y gas.
- ii. Servicios de regulación: comprenden los beneficios derivados de la autorregulación de los procesos ecosistémicos, tales como el mantenimiento de la calidad del aire, el control de la erosión y purificación del agua.
- iii. Servicios culturales: engloban los beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas, incluyendo el enriquecimiento espiritual, la belleza escénica, la inspiración artística e intelectual y recreación.
- iv. Servicios de soporte: se definen como los servicios y procesos ecológicos fundamentales necesarios para la provisión y existencia de los demás servicios

ecosistémicos, tales como el ciclo de nutrientes y la formación de suelo, la fotosíntesis y producción primaria, y el ciclo del agua.

Los páramos son uno de los ecosistemas más importantes del mundo, y uno de los que menos se menciona, y del cual menos se conoce sus beneficios. Son ecosistemas con una notable biodiversidad que ofrecen múltiples servicios ecosistémicos, tales como la regulación hídrica, captura de carbono, protección del suelo y conservación de la biodiversidad, entre otros (Pinos et al., 2021).

El suelo de páramo tiene la capacidad de acumular grandes cantidades de carbono, gracias a la cobertura vegetal y las bajas temperaturas que disminuyen las tasas de descomposición de la materia orgánica almacenada en él (Molina et al., 2019). Además, los páramos actúan como importantes reservorios de agua, regulando el flujo hídrico y proporcionando agua dulce a las comunidades circundantes. Estos ecosistemas son esenciales no solo para la biodiversidad local, sino también para la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono y la regulación del ciclo del agua (Rincón et al., 2014).

Los servicios ecosistémicos son fundamentales para la agricultura, alimentación y la calidad de vida. Para asegurar estos servicios esenciales, es crucial conservar, proteger y restaurar la biodiversidad, así como recuperar las funciones de los ecosistemas. Es prioritario mantener el funcionamiento del ecosistema global y evitar cambios significativos en el sistema terrestre hacia estados distintos. Durante siglos, la humanidad ignoró la generación de estos servicios al considerarlos ilimitados, pero ahora es indispensable conservar los ecosistemas para seguir disfrutando de estos beneficios (Pinos et al., 2021).

#### **2.1.6. Zona de recarga hídrica**

La zona de recarga hídrica es aquella área de la cuenca hidrográfica, que, por condiciones climáticas, geológicas y topográficas, una gran parte del agua de las lluvias se infiltra en el suelo hacia los estratos más profundos, es decir los acuíferos, esto depende de varios factores, como son el tipo de roca, suelo, cobertura vegetal, pendiente y uso de suelo de la zona (Figueredo, 2019). Generalmente estas zonas se ubican en las partes altas de la cuenca y casi siempre más arriba de donde afloran los ríos, quebradas, lagos y lagunas.

#### **2.1.7. Páramo**

Los páramos son ecosistemas de alta montaña de crucial importancia ecológica y socioeconómica. Al estar ubicados sobre la cordillera de los Andes, se encuentran por lo general a alturas andinas entre los 3200 y 4700 metros sobre el nivel del mar, generalmente el clima es frío y húmedo lo que les caracteriza y distingue de otros ecosistemas montañosos

del mundo haciéndolos únicos (Quinteros et al., 2013). En Ecuador los páramos se extienden por aproximadamente 13371.19 km<sup>2</sup> llegando a ser el país con mayor superficie de páramo con respecto a su extensión total (Mena, 2011).

El clima de los páramos ecuatorianos es uno de sus aspectos más distintivos y determinantes. Caracterizado por una alta variabilidad diaria, las temperaturas en estos ecosistemas pueden fluctuar drásticamente en cuestión de horas oscilando entre los -4°C y 20°C en un solo día, sometiendo a la flora y fauna local a condiciones extremas, la temperatura media anual se mantiene en un rango relativamente frío, entre 2°C y 10°C, lo que influye significativamente en los procesos biológicos y geoquímicos del ecosistema (Llambí et al., 2012).

La precipitación en los páramos es otro factor clave en su ecología. Con una variación anual que va desde los 500 mm hasta los 3000 mm, dependiendo de la ubicación específica, estos ecosistemas reciben una cantidad considerable de agua (Llambí et al., 2012). Esta precipitación, distribuida de manera relativamente uniforme a lo largo del año, se combina con una humedad relativa consistentemente alta, que a menudo supera el 80%. Estas condiciones hídricas son fundamentales para la función de los páramos como reguladores del ciclo del agua en las regiones andinas (Pinos et al., 2021).

#### **2.1.8. Topografía**

Los páramos del Ecuador son caracterizados por grandes elevaciones, laderas inclinadas y valles, estos últimos presentan una topografía relativamente plana o con pendientes suaves, diferenciándose de la topografía a su alrededor de mayor elevación y pendientes pronunciadas (Contreras & Fernández, 2021). Estas zonas de valles suelen formarse en depresiones topográficas donde convergen aguas superficiales y subterráneas, lo que facilita la acumulación de materia orgánica y carbono en los suelos Histosoles (Bimos & Verdugo, 2023).

Las zonas planas de los valles favorecen la retención de agua, creando condiciones de saturación que ralentizan la descomposición de la materia orgánica y promueven la acumulación de turba o material orgánico (Comas et al., 2017). Dentro de la cuenca, estas áreas son importante dentro del ciclo hidrológico y el almacenamiento de carbono en el suelo del páramo (Chuncho, 2019).

#### **2.1.9. Tipos de suelos**

Los suelos de páramo son fundamentales para las funciones ecosistémicas e hidrológicas, y se caracterizan por una variedad de tipos de suelo con propiedades físicas y químicas destacadas (Osorio Rivera et al., 2022). En el sur de Ecuador, predominan los Andosoles e Histosoles, con Leptosoles y Regosoles en áreas de pendientes pronunciadas (Amay, 2018).

Estos suelos son oscuros y ricos en materia orgánica, lo que les permite una alta capacidad de retención de agua. Este fenómeno se debe a la presencia de mesoporos y microporos en los agregados del suelo, impulsados por la materia orgánica y sus complejos con minerales (Molina et al., 2019). Los Andosoles e Histosoles varían en su composición, siendo los Andosoles más extendidos y los Histosoles con un horizonte orgánico más profundo debido a su ubicación en los fondos de los valles (MAATE, 2018).

#### **2.1.9.1. Andosoles.**

Los Andosoles, también conocidos como Andisoles según la clasificación de la Soil Taxonomy, son suelos característicos de zonas de páramo debido a su color oscuro, son los más predominantes y desarrollados a partir de cenizas volcánicas (Chinchilla et al., 2011). Estos suelos caracterizados por su textura arenosa y abundante contenido de minerales primarios y vidrio volcánico aproximadamente un 25% de su composición, son ricos en aluminio y hierro que forman complejos organometálicos con el carbono orgánico del suelo, presentan una densidad aparente baja ( $< 0,8 \text{ g/cm}^3$ ), un pH ( $< 5$ ), alta porosidad y excelente capacidad de retención de agua de hasta un 55% de su peso seco (Molina et al., 2019).

Su pH ligeramente ácido entre 5 y 6 favorece la disponibilidad de nutrientes como el hierro (Fe) y aluminio (Al), su capacidad de retención de fósforo (P) es superior al 25% y su alto contenido de materia orgánica que puede superar el 10%, contribuye a una alta capacidad de intercambio catiónico y a una estructura estable (Hofstede et al., 2023). Crucial para el almacenamiento a largo plazo de carbono, ya que la materia orgánica ligada a minerales reactivos en el suelo contribuye significativamente a este proceso (Burbano, 2018).

Estudios realizados en diferentes áreas de páramo muestran que el horizonte A de los Andosoles presenta un alto contenido de carbono, con valores promedio significativamente mayores en comparación con los horizontes AC, CA y C. Por ejemplo, en el páramo de Quimsacocha, se ha encontrado que los horizontes superficiales de Andosoles pueden contener hasta un 26.50% de materia orgánica (Mena, 2011).

#### **2.1.9.2. Histosoles**

Estos suelos se caracterizan por cumplir un importante rol dentro del proceso de regulación y almacenamiento del agua en los ecosistemas de páramo, se caracterizan por estar saturados de agua y presentar una gran capacidad de retención, por la naturaleza de su formación y condiciones ambientales este tipo de suelo tiene valores de pH bajo entre 4.5 y 5 (Borja et al., 2008), es común encontrarlos en áreas que permanecen constantemente saturadas con agua durante gran parte del año, estas condiciones climáticas favorecen la acumulación de materia orgánica. Incluso a profundidades superiores a los 40 cm, estos

suelos contienen cantidades significativas de materia orgánica (Llambí et al., 2012). Principalmente están compuestos por restos vegetales (como plantas de bosque o musgos) en diversos grados de descomposición.

A diferencia de otros tipos de suelo, el material parental en los Histosoles es material orgánico fresco. Esto requiere condiciones como un clima frío y húmedo que retarda la descomposición de la materia orgánica, así como terrenos planos o zonas de depresión que facilitan la acumulación de agua (Contreras & Fernández, 2021). Es importante destacar que la formación de los Histosoles es un proceso prolongado, determinado por la velocidad de descomposición de la materia orgánica.

Según Llambí et al., (2012) en un estudio realizado en el sur del país en un ecosistema de páramo, se encontró que los primeros centímetros de los Histosoles contenían un 33.11% de materia orgánica, lo que subraya su alto contenido característico de estos ecosistemas, al estar formados casi en su totalidad por materia orgánica estos suelos presentan densidades aparentes muy bajas (0.04 - 0.2) g/cm<sup>3</sup>.

#### **2.1.9.3. Leptosoles**

En el páramo andino del sur del Ecuador, los Leptosoles son suelos caracterizados por su delgadez y desarrollo superficial limitado, con horizontes A y B débilmente desarrollados o ausentes, estos suelos son predominantes en áreas de alta pendiente donde la erosión es activa, lo que los hace vulnerables a la pérdida de nutrientes y agua (Delgado-Carranza et al., 2017). Su papel principal suele ser de transición en la dinámica hidrológica y de nutrientes del ecosistema, influyendo en la capacidad de soporte vegetal y la estabilidad del suelo en terrenos montañosos (Delgado-Carranza et al., 2017).

#### **2.1.9.4. Regosoles**

En el páramo andino, los regosoles son suelos jóvenes con un horizonte A superficial y variabilidad en la presencia de horizontes B. Se forman por la acumulación reciente de materiales, influenciados por procesos geomorfológicos como la deposición de sedimentos (Llambí et al., 2012).

Estos suelos tienen una capacidad variable para retener agua y nutrientes, siendo importantes para la colonización vegetal temprana y la agricultura de subsistencia en áreas con fluctuaciones en el nivel freático (Contreras & Fernández, 2021). La dinámica de los regosoles en el páramo refleja su adaptabilidad a las condiciones cambiantes del entorno, influenciando la biodiversidad local y la resiliencia ecológica frente a factores como el cambio climático y las actividades antropogénicas (Casco & Patiño, 2021).

### 2.1.10. Perfil de Suelo

En los páramos altoandinos de la zona sur de Ecuador, los suelos se desarrollan en un ambiente de alta humedad y bajas temperaturas, predominando materiales volcánicos que favorecen la formación de horizontes específicos tal como se observa a continuación en la Figura 2:



Figura 2. Estratificación de horizontes del suelo en páramos del sur del Ecuador.

Fuente: (Huerta, 2016)

El horizonte H es predominante en suelos Histosoles, característicos por la acumulación de materia orgánica en condiciones de saturación de agua y bajas temperaturas (Hribljan et al., 2016). Este horizonte almacena cantidades significativas de carbono orgánico, llegando a registrar hasta 128,2 kg C/m<sup>2</sup> en humedales de alta montaña. Este proceso es influenciado por la baja tasa de descomposición anaeróbica (Calispa et al., 2023).

Horizonte A: Es el horizonte superficial y está caracterizado por su color oscuro debido a la alta concentración de materia orgánica. Este horizonte tiene un espesor promedio que varía entre 10 y 30 centímetros. La materia orgánica presente en el horizonte A proviene principalmente de la descomposición de restos vegetales y animales. Esta capa orgánica no solo proporciona nutrientes esenciales para la vegetación, sino que también juega un papel crucial en la retención de agua, promoviendo así la estructura del suelo y la actividad biológica (Jaramillo, 2002).

Horizonte C: El horizonte C es el más profundo y está compuesto por material inalterado de origen volcánico. Se encuentra generalmente más allá de los 40 centímetros de profundidad. Este horizonte proporciona los minerales primarios que eventualmente se descomponen y enriquecen los horizontes superiores del suelo. Dado que el horizonte C está menos afectado por la actividad biológica y la meteorización, conserva características geológicas más cercanas a su origen volcánico, lo que lo hace crucial para comprender la historia geológica y la formación del suelo en la región (Albán, 2019).

Estos horizontes del suelo varían en profundidad y desarrollo según factores como la altitud, la pendiente y la vegetación, contribuyendo de manera significativa a las características únicas de los suelos en los páramos altoandinos del sur de Ecuador.

### **2.1.11. Cobertura Vegetal**

La cobertura vegetal influye significativamente en el ciclo del carbono para el almacenamiento de carbono en el suelo. Cuando las plantas absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera, lo convierten en materia orgánica. Cuando estas plantas mueren y caen al suelo, los organismos descomponedores liberan parte del CO<sub>2</sub> a la atmósfera y otros elementos químicos al suelo. La materia orgánica restante se convierte en humus que pasa a conformar el suelo ayudando a desarrollar un suelo más profundo que protege contra la erosión y la pérdida de nutrientes (Mena, 2011). La biodiversidad de los páramos ecuatorianos es notable, la flora comprende aproximadamente 1500 especies de plantas vasculares, muchas de las cuales son endémicas.

#### **2.1.11.1. Pajonal**

El pajonal se distingue por sus hojas largas y delgadas que forman penachos, proporcionando protección a las hojas en su interior, donde la temperatura no baja de cero grados (Mena, 2011). Las especies principales incluyen *Stipa*, *Calamagrostis*, *Festuca* y diversas ciperáceas. Las hojas muertas dentro de la estructura del pajonal conservan nutrientes y actúan como un "suelo colgante", descomponiéndose para permitir el crecimiento de nuevas raíces. Los pajonales son vulnerables a incendios provocados por agricultores para mantener prácticas tradicionales de pastoreo (Mena, 2011).

La estructura granular de los suelos de pajonal facilita la infiltración y almacenamiento de agua, permitiéndoles retener hasta el 200% de su peso seco en agua, lo que los convierte en reguladores hidrológicos cruciales para las cuencas que abastecen ciudades importantes de la región. Además, su capacidad para almacenar carbono, estimada entre 100 y 200 t/ha en el primer metro de profundidad, los posiciona como elementos clave en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, estos valiosos suelos enfrentan amenazas significativas, incluyendo la expansión de la frontera agrícola, las quemadas frecuentes y la creciente actividad minera, lo que subraya la urgente necesidad de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible que consideren la vulnerabilidad y las características únicas de estos suelos para asegurar la continuidad de los servicios ecosistémicos vitales que proporcionan (Gobierno autónomo Descentralizado del Distrito Metropolitano de Quito, 2024).

### 2.1.11.2. Almohadilla

La vegetación de almohadilla se encuentra principalmente en zonas planas donde el agua tiende a acumularse debido a la escorrentía, es vegetación compacta, bien adaptadas al entorno, creando microclimas menos fríos bajo su dosel (Mena, 2011).

La vegetación de almohadilla es altamente eficiente en la producción y retención de materia orgánica, así como en la conservación de nutrientes y humedad. Las especies características son *Azorella pendunculata*, *Plantago rigida* y *Distichia muscoides* (Mena, 2011). Estos ecosistemas albergan una gran variedad de especies vegetales, pero debido a su proximidad a los pajonales, reciben aportes similares de materia orgánica.

Las almohadillas, como parte de la vegetación de los páramos, presentan características distintivas debido a la acumulación de agua en las áreas bajas, lo que provoca una descomposición lenta de la materia orgánica (Molina et al., 2019). Existe una relación interdependiente entre el agua y la materia orgánica: en condiciones de alta humedad, la descomposición es limitada y a su vez una abundante materia orgánica retiene agua. Este fenómeno permite que los complejos formados retengan nutrientes, evitando que sean fácilmente absorbidos por las plantas. Aunque el suelo del páramo es pobre en fósforo, tiene un alto potencial de fertilidad, este no es accesible para la vegetación, lo que influye en el almacenamiento de carbono en el ecosistema (Quinteros et al., 2013).

### 2.1.11.3. Turbera

Las turberas son ecosistemas húmedos donde la vegetación en descomposición se acumula en suelos saturados de agua, creando capas de materia orgánica parcialmente descompuesta conocida como turba. Este proceso ocurre principalmente porque la falta de oxígeno en estos ambientes ralentiza la descomposición (Comas et al., 2017). Las turberas son especialmente importantes para el ciclo global del carbono, ya que almacenan aproximadamente 550 gigatoneladas de carbono, lo que representa más que todo el carbono contenido en los bosques del mundo, a pesar de que cubren solo el 3% de la superficie terrestre, se estima que las turberas acumulan carbono a tasas de 0.5 a 1 milímetro por año, lo que las convierte en sumideros clave para el carbono atmosférico (Suárez et al., 2022).

Además de su papel en la mitigación del cambio climático, las turberas desempeñan funciones ecológicas fundamentales, como la regulación del flujo de agua y el mantenimiento de hábitats para diversas especies de flora y fauna. En zonas montañosas, como los páramos de los Andes, las turberas también son esenciales para el suministro de agua potable y la irrigación agrícola.

Sin embargo, a pesar de su importancia, las turberas están amenazadas por actividades humanas, como la agricultura, el drenaje para pastoreo y el uso de su turba como combustible o sustrato en horticultura (Suárez et al., 2022). Se estima que aproximadamente el 15% de las turberas del mundo han sido degradadas, lo que no solo libera carbono almacenado, sino que también afecta negativamente su capacidad para regular el agua y proteger la biodiversidad (Suárez et al., 2022). Iniciativas de restauración, como las implementadas en los páramos de Ecuador, han demostrado ser efectivas para revertir algunos de estos impactos, promoviendo la recuperación de la vegetación nativa y la reactivación de los ciclos naturales de almacenamiento de carbono (Comas et al., 2017).

### **2.1.12. Almacenamiento de Carbono**

El almacenamiento de carbono es una función crucial de los páramos. Estos suelos ricos en materia orgánica pueden almacenar carbono hasta 1700 (t/ha), una cantidad que supera la capacidad de muchos bosques tropicales. El carbono constituye aproximadamente el 0.27% de la masa de los elementos de la corteza terrestre (Castañeda & Montes, 2017). La cantidad de carbono en el suelo está estrechamente relacionada con su grado de desarrollo, siendo los suelos más desarrollados aquellos que retienen más agua y acumulan más carbono. También los bosques son particularmente importantes en el almacenamiento de carbono porque los árboles contienen más carbono por unidad de área que otros tipos de vegetación, dado que el 50% de su biomasa está compuesta por carbono.

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del páramo andino al sur del Ecuador es un fenómeno complejo que involucra varios factores ambientales y antropogénicos. Este ecosistema de montaña es conocido por su alta capacidad de secuestro de carbono, tanto en la biomasa aérea como en el suelo. En los primeros 40 cm de profundidad del suelo del páramo, se pueden almacenar carbono entre 119 y 397 t/ha, lo que destaca su importancia como sumidero de carbono (Suárez Duque et al., 2016)

La biomasa aérea en el páramo, aunque también contribuye al almacenamiento de carbono, tiene una capacidad menor comparada con el suelo (Castañeda & Montes, 2017). La variación en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea puede oscilar entre 13.21 y 183 t/ha. Sin embargo, estudios sugieren que las condiciones del suelo y la cobertura vegetal tienen un papel más significativo en la capacidad de almacenamiento de carbono del ecosistema de páramo (Castañeda & Montes, 2017).

Estas características posicionan a los páramos como actores importantes en la mitigación del cambio climático global. La importancia de los suelos de páramo en la mitigación del cambio climático se atribuye a su capacidad para almacenar grandes cantidades de carbono orgánico, lo cual es esencial para la regulación del clima y la reducción de las emisiones de

CO<sub>2</sub>. Estos suelos, debido a sus bajas tasas de mineralización y altas tasas de humedad, permiten una lenta descomposición de la materia orgánica, facilitando así la acumulación de carbono (Hofstede et al., 2023).

La actividad humana, especialmente la agricultura y ganadería, representa una amenaza considerable para la capacidad de almacenamiento de carbono de estos suelos. La conversión de páramos naturales a usos agrícolas intensivos puede reducir drásticamente los niveles de carbono almacenado debido a la disminución de la cobertura vegetal y al aumento de la erosión del suelo (Vanacker et al., 2003). En comparación con suelos bajo vegetación natural, los suelos utilizados para pastizales y cultivos muestran una disminución notable en los contenidos de carbono orgánico debido a prácticas agrícolas inadecuadas y la falta de fertilización apropiada (Castañeda & Montes, 2017).

Las actividades agrícolas reducen el contenido de carbono acumulado en el páramo. En primer lugar, la remoción de la vegetación nativa disminuye la entrada de materia orgánica al suelo y aumenta la descomposición de los residuos vegetales (Campi, 2023). Además, la labranza favorece la descomposición y la liberación de carbono que está almacenado en el suelo. Así mismo, la incorporación de enmiendas como cal agrícola y dolomita también libera CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

#### **2.1.13. Profundidad del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono**

La profundidad del suelo es un factor clave para la determinación del almacenamiento de carbono orgánico, la mayor cantidad de carbono orgánico se encuentra principalmente en los estratos superficiales, es decir, en los primeros 40 cm esto se debe a la densidad de la cobertura vegetal y la cantidad de raíces presentes por unidad de área, las cuales son importantes en la fijación del carbono en el suelo (Maza et al., 2024).

A medida que la profundidad del suelo aumenta, el contenido de materia orgánica y carbono puede disminuir, especialmente en áreas con pajonal, el contenido de carbono orgánico en el suelo puede variar entre 119 y 397 t/ha de carbono, bajo vegetación natural, por otra parte, en zonas de turberas a profundidad de hasta 5 metros se alcanzan en promedio 1573 t/ha de carbono (Castañeda & Montes, 2017). Esta dinámica resalta la importancia de la gestión del suelo y su cobertura vegetal para optimizar el almacenamiento de carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático.

#### **2.1.14. Actividades antrópicas que afectan a los suelos de páramo**

En Ecuador, la actividad humana intensa en los páramos es evidente en el pastoreo extensivo, las quemadas periódicas del pajonal, la conversión del páramo en tierras agrícolas y

la tala de bosques nativos, lo que está provocando una degradación continua del ecosistema (Vanacker et al., 2003). Estas acciones no solo alteran la vegetación nativa y la estructura del suelo, sino que también ponen en peligro la funcionalidad del páramo y afectan el suministro de servicios ambientales esenciales, como el agua, el suelo y los bosques (Campi, 2023).

Las quemadas no controladas, utilizadas tradicionalmente para la regeneración de pastos, pueden tener efectos devastadores en la vegetación nativa y la estructura del suelo (Vanacker et al., 2003). Además, las actividades mineras, tanto a pequeña como a gran escala, representan otra amenaza seria, alterando el paisaje y potencialmente contaminando fuentes de agua. Esta integración refuerza la descripción de las amenazas antropogénicas que enfrentan los páramos, proporcionando ejemplos específicos de actividades humanas perjudiciales y sus consecuencias, lo cual se alinea bien con el contenido existente y mejora la comprensión de los desafíos de conservación que enfrentan estos ecosistemas (Pinos et al., 2021).

En respuesta a estas amenazas, Ecuador ha implementado diversas estrategias de conservación. La creación de áreas protegidas como el Parque Nacional Cajas y la Reserva Ecológica Antisana ha sido fundamental para salvaguardar importantes extensiones de páramo. El programa Socio Páramo, que ofrece incentivos económicos a comunidades locales para la conservación, es un ejemplo innovador de cómo integrar la conservación con el desarrollo comunitario (Armero-Estrada & Waldrón-Henríquez, 2018).

La investigación científica juega un papel crucial en la conservación de los páramos. Numerosos estudios se llevan a cabo para comprender mejor la dinámica de estos ecosistemas, su respuesta al cambio climático y las mejores prácticas para su manejo sostenible. Paralelamente, los programas de educación ambiental y ecoturismo sostenible buscan crear conciencia sobre la importancia de los páramos y generar alternativas económicas que sean compatibles con su conservación (Roux, 2013).

La conservación de los páramos requiere un enfoque integral que considere aspectos ecológicos, sociales y económicos, asegurando su persistencia para las generaciones futuras. La gestión sostenible de estos "castillos de agua" andinos es un desafío que Ecuador debe abordar con urgencia y compromiso, reconociendo que el futuro de gran parte de su biodiversidad y recursos hídricos depende de la salud de estos ecosistemas únicos.

## 2.2. Estado del Arte

El estudio del carbono orgánico en suelos (COS) ha generado gran impacto en la actualidad debido a su papel fundamental en la mitigación del cambio climático y en la salud de los ecosistemas. El suelo es la mayor reserva de carbono terrestre y la segunda a nivel mundial, después de los océanos, superando las reservas de carbono de la atmósfera y la vegetación. En las cuencas hidrográficas, este carbono contribuye a reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico y estabiliza los ecosistemas a través del ciclo de nutrientes y el mantenimiento de la estructura del suelo.

Los suelos de los valles, por lo general tienen una topografía plana con mayor profundidad de horizonte, especialmente el horizonte A, donde se almacena la mayor cantidad de carbono. La capacidad de estos suelos para almacenar y retener carbono depende de factores como el tipo de suelo, la vegetación y el clima de la región.

El estado del arte sobre la determinación del stock del carbono en los suelos de los valles de páramos altoandinos, permite comprender de mejor manera por qué estos suelos y los páramos, son tan eficientes en almacenar grandes cantidades de carbono, así como también por qué son de gran importancia para los ecosistemas, y el desarrollo de vida en el planeta, principalmente debido a los servicios ecosistémicos que cumple.

Al analizar diferentes estudios sobre el almacenamiento de carbono y su dinámica en los suelos de páramos altoandinos, autores como Hribljan et al. (2016) refuerzan esta importancia, mediante un análisis del stock de carbono realizado en los suelos de páramo de Ecuador, se encontró que estos almacenan en promedio 1282 (T/ha) en una profundidad de 3.8 metros. Este valor destaca en comparación con otras regiones de páramo, debido a las grandes entradas de material mineral (48% del total de C en algunos horizontes) derivadas de depósitos volcánicos, los cuales también contribuyen a la acumulación de carbono a largo plazo. En cuanto a las tasas de acumulación de carbono, se menciona que los suelos con más de 3000 años de antigüedad acumulan carbono a una tasa promedio de 260 t/ha al año, mientras que los suelos más jóvenes, con menos de 500 años, presentan tasas de acumulación de hasta 134 t/ha al año.

Por otro lado, el estudio realizado por Camacho et al., (2021) analiza la distribución de carbono orgánico en suelos colombianos, con enfoque a la región Andina, al ser una de las áreas con mayor capacidad de almacenamiento de carbono mediante el uso de técnicas de mapeo digital de suelos y el método de predicción Regression Kriging, que facilita una estimación precisa de COS (carbono orgánico en suelo) en los primeros 30 cm de profundidad. Con una base de datos de más de 4300 perfiles de suelo.

Los resultados obtenidos indican que la región Andina tiene un promedio de 83.8 t/ha para almacenamiento de COS, lo cual es un valor significativamente superior al de otras regiones colombianas Camacho et al., (2021). Este alto nivel de retención está asociado a los suelos volcánicos de los Andes, que favorecen el almacenamiento de carbono gracias a su estructura y condiciones ambientales.

Principalmente se debe a las bajas temperaturas que tiene la región, lo cual limita la actividad microbiana, desfavoreciendo a la descomposición de la materia orgánica y, en consecuencia, potencia la acumulación de COS. Comparando con estudios en los páramos ecuatorianos, los valores de carbono en los Andes colombianos son consistentes, ya que estos ecosistemas tienden a registrar más de 120 t /ha especialmente en áreas de características similares.

En el artículo "Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador", Loayza et al., (2020) presentan un estudio sobre la estimación del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en Ecuador, con un enfoque particular en su variabilidad espacial y los factores ambientales que influyen en su almacenamiento. Se menciona la aplicación del modelo geoestadístico de Regresión-Kriging, en los perfiles de suelo con 140 covariables edáficas y ambientales. Esto permitió estimar el contenido de COS dentro de los primeros 30 cm de profundidad del suelo, logrando una resolución espacial de 1 km, factor en común a la metodología del autor Camacho et al., (2021).

Los resultados revelaron que en Ecuador la reserva total de COS almacenado de 0 a 30 cm de profundidad, se estimó en 163000 t/ha  $\pm$  38000 t/ha. En particular, la región andina se destacó por tener la mayor concentración de COS, donde los valores superaron las 120 t/ha (Loayza et al., 2020). Además, el artículo discute sobre las prácticas agrícolas insostenibles, que pueden llevar a la pérdida de COS y, por ende, a la degradación y erosión del suelo. Este es especialmente relevante para la región andina del sur de Ecuador, donde la agricultura intensiva puede comprometer la salud del suelo y su capacidad de secuestro de carbono.

Según Castañeda & Montes (2017) en su estudio denominado "Carbono almacenado en páramo andino", mencionan que el suelo en esta zona puede almacenar carbono entre 119 y 397 t/ha en los primeros 40 cm de profundidad, esto concuerda con los diferentes estudios analizados, en que la mayor cantidad de carbono se almacena en los horizontes más superficiales, es decir el horizonte A.

También los horizontes más profundos del suelo influyen en la retención de carbono, ya que su formación y contenido de aluminio (Al) y hierro (Fe) ayudan a mantener el carbono orgánico estable y menos vulnerable a la descomposición microbiana. En suelos de turberas generalmente alcanzan profundidades entre 0.7 y 3 metros, el carbono almacenado puede

alcanzar valores elevados debido a las condiciones de saturación del suelo y la baja tasa de descomposición. (Camacho et al., 2021).

La capacidad de almacenamiento en el suelo se debe a características ambientales propias del páramo, autores como Hribljan et al. (2016), Camacho et al. (2021), Loayza (2020), y Castañeda & Montes (2017) coinciden en que las variables ambientales como la temperatura y la precipitación son de suma importancia para el almacenamiento de carbono en suelos andinos. La combinación de un clima frío y suelos de origen volcánico proporciona las condiciones óptimas para la acumulación de materia orgánica en esta región, haciendo de los Andes un reservorio crucial de carbono, también destacan la importancia de conservar estos ecosistemas montañosos para contribuir a los objetivos de mitigación del cambio climático.

En la microcuenca Cuevas, ubicada en la región altoandina del sur de Ecuador, estudios recientes realizados por Contreras & Fernández (2021) indican que el almacenamiento total de carbono (TCS) varía según la cobertura vegetal, con valores medios de 274.3 t/ha para pajonal, 342.7 t/ha para almohadilla y 410.5 t/ha para bosque nativo. En cuanto a la topografía, las posiciones cóncavas muestran mayores acumulaciones de carbono en comparación con las convexas y rectas, con valores promedio de 365.3 t/ha en áreas rectas, 351.6 t/ha en convexas y 310.6 t/ha en cóncavas (Contreras & Fernández, 2021).

Contreras & Fernández (2021) mencionan la importancia del espesor del suelo concluyendo que el espesor es mayor en áreas de vegetación de almohadilla, lo cual está asociado con una mayor acumulación de carbono. Estos resultados refuerzan la importancia de la cobertura vegetal y la topografía para entender las dinámicas del carbono en suelos altoandinos.

Pese a que existen varios de estudios sobre el stock de carbono y su dinámica en los suelos de páramo, pocos de ellos se centran en analizar el stock en suelos de los valles, a pesar de ser estos suelos más profundos, saturados y con condiciones más adecuadas, pudiendo ser los que mayor cantidad de carbono almacenen, es por esto que el presente estudio analizó el stock de carbono en suelos de los valles de la microcuenca “Cuevas”, de esta manera se puede comparar con las distintas topografías y analizar la importancia de estos suelos de valles en el almacenamiento de carbono.

### 3. Metodología

#### 3.1. Área de Estudio.

El área de estudio se encuentra en la microcuenca "Cuevas", dentro de la cuenca hidrográfica del río Yanuncay, ubicada entre las parroquias de Baños y Chaucha, en el sector Cancán, aproximadamente a 40 km al suroeste del cantón Cuenca, Ecuador. Esta región forma parte de la cuenca del río Paute, crucial para el abastecimiento de agua a la ciudad de Cuenca, y se encuentra dentro de las áreas protegidas por ETAPA EP (Cancán – Sigsihuayco), así como en la cuenca del río Sigsihuayco.

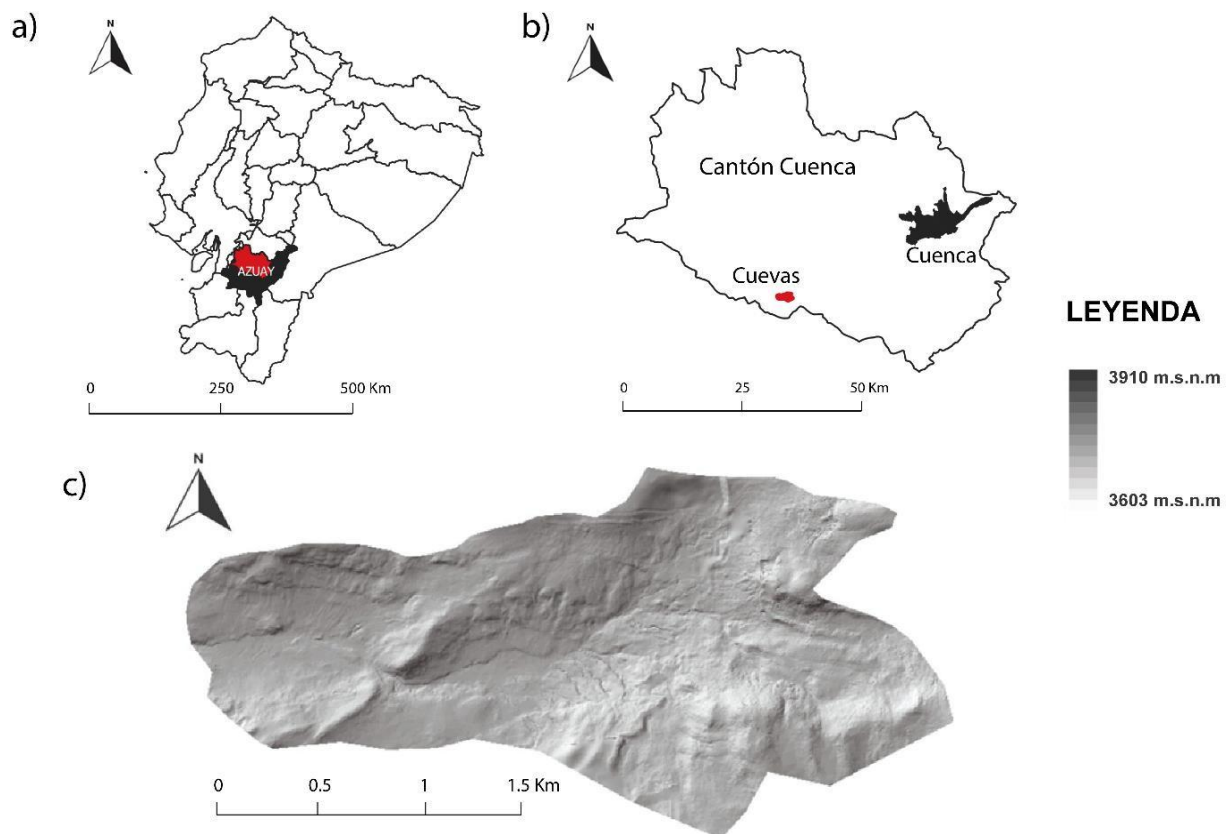


Figura 3. Área de estudio.

Nota: (a) Ecuador continental con ubicación del Azuay, (b) Mapa del cantón Cuenca y (c) Modelo de Elevación Digital (DEM) de la microcuenca Cuevas.

La extensión del área es aproximadamente 4.2 km<sup>2</sup> y se caracteriza por contener un 81% de pajonal (páramo) con la especie *Calamagrostis intermedia*. La segunda cobertura es de almohadilla, con *Paspalum bonplandianum* y *Plantago rigida*, que abarca el 17.6%, y pequeñas fracciones de bosque nativo de *Polylepis*, cercano al 2% (Molina et al., 2019). La altitud oscila entre 3603 m s.n.m. y 3910 m s.n.m. En cuanto a la topografía, presenta ligeras pendientes de alrededor de 10° en las zonas de los valles, hasta 34° en las laderas (Contreras & Fernández, 2021).

La precipitación en la zona es bimodal, con un alto régimen de precipitación y una media anual de aproximadamente 900 mm (ETAPA EP), con máximas de 1220 mm y mínimas de 466 mm (Amay, 2018). La temperatura alcanza máximas de 18 °C y mínimas de 0 °C. El invierno austral se presenta como estación seca desde junio hasta agosto (Asanza & Barahona, 2015). En general, el clima es frío y húmedo, con notable presencia de neblina. En la región, es común la presencia de chubascos y lluvias durante el invierno, mientras que en verano se registran vientos intensos y heladas.

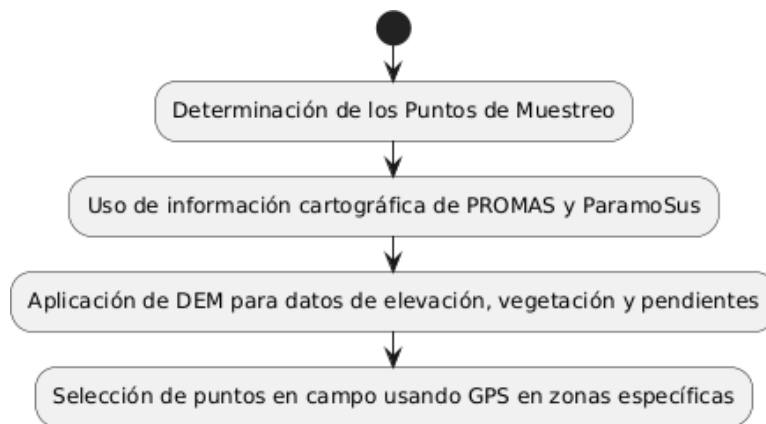
En cuanto a los suelos, en la zona se observa una coloración negra debido a su alto contenido de materia orgánica, resultado de la intensa meteorización. Estos suelos presentan baja disponibilidad de cationes básicos y silicio, y una retención significativa de fósforo (cita). Además, son suelos ácidos con un pH no mayor a 5, tienen una baja densidad aparente (menor a 0.9 g/cm<sup>3</sup>) y un alto contenido de carbono orgánico que puede alcanzar hasta un 20% (Molina et al., 2019). Según la clasificación taxonómica de World Reference Base, los suelos predominantes son los Andosoles no alofánicos en las laderas y los Histosoles en los valles (Asanza & Barahona, 2015). Los andosoles contribuyen a la alta capacidad de retención de agua y nutrientes. Estos suelos son comunes en laderas con pendientes moderadas a pronunciadas, donde las condiciones climáticas de alta humedad y bajas temperaturas favorecen su formación. Sin embargo, debido a la meteorización química, los horizontes superiores carecen de alófanos y minerales de caolinita, no obstante, son ricos en complejos orgánico-metálicos (Molina et al., 2019).

Por otro lado, los Histosoles se encuentran en áreas con acumulación constante de agua, como valles y zonas planas. Son abundantes en restos vegetales en diferentes estados de descomposición, lo que indica un proceso prolongado de formación bajo condiciones de clima frío y húmedo. Estos suelos se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica fresca, acumulada debido a la retención de agua en terrenos planos con menor drenaje (Contreras & Fernández, 2021).

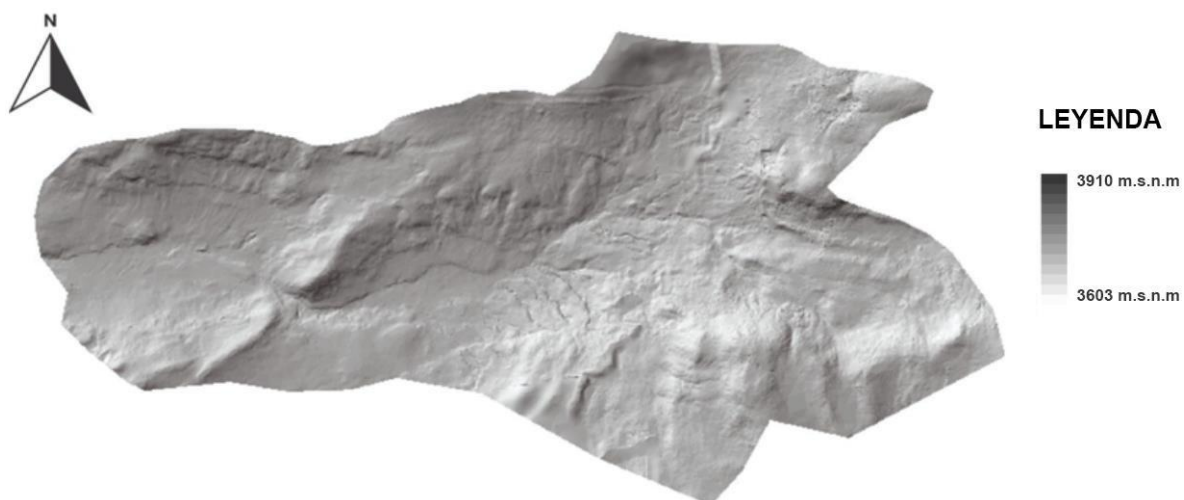
Las actividades antropogénicas son evidentes en el área de estudio, incluyendo pastoreo intensivo de ganado bovino y equino, quemas y agricultura, que afectan la calidad ambiental y deterioran las propiedades del suelo, comprometiendo servicios ecosistémicos clave como el suministro de agua y el almacenamiento de carbono en el suelo (Contreras & Fernández, 2021). Desde 2010, la empresa pública "ETAPA EP" se ha comprometido con la conservación y protección de esta área como zona de recarga hídrica para la ciudad (Molina et al., 2019).

### 3.2. Determinación de los puntos de muestreo

La determinación de los puntos de muestreo se desarrolló utilizando información cartográfica proporcionada por el “Programa para el Manejo del Agua y del Suelo” (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, en colaboración con el proyecto “ParamoSus”, obteniendo información con el Modelo Digital de Elevación (DEM), que incluye datos espaciales de elevaciones, cobertura vegetal y pendientes de la microcuenca "Cuevas", como se observa en la *Figura 4*.

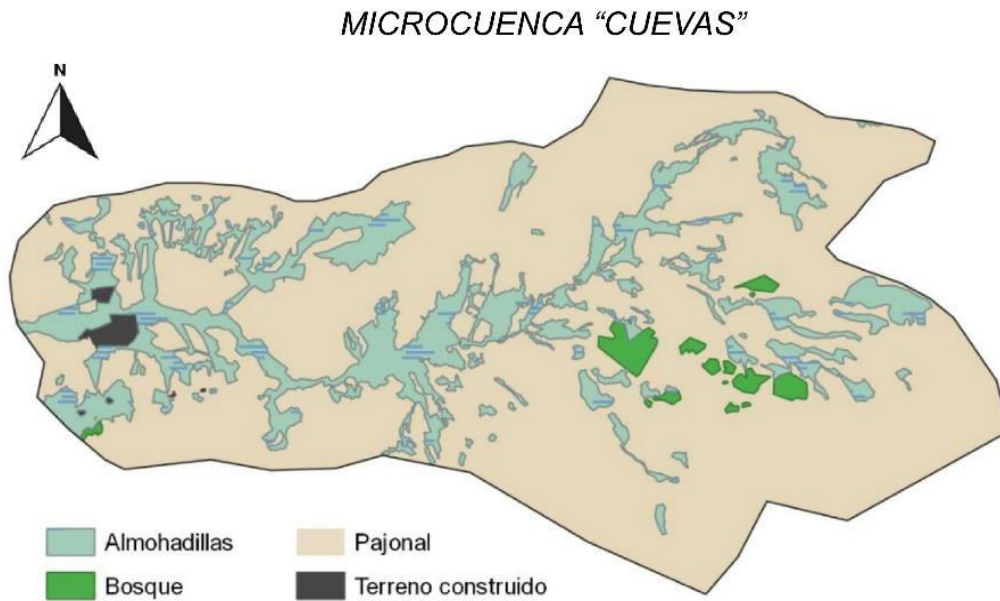


*Figura 4. Diagrama de flujo determinación de los puntos de muestreo.*



*Figura 5. Modelo de Elevación Digital (DEM) de la microcuenca Cuevas.*

Por otra parte, la Figura 6 obtenida por Contreras & Fernández (2021), muestra la distribución de la cobertura vegetal en diferentes tipos como almohadillas, pajonales y bosque nativo en la microcuenca “Cuevas”.



*Figura 6. Distribución de las coberturas vegetales en la microcuenca.*

*Fuente: (Contreras & Fernández, 2021).*

La determinación de los puntos de muestreo se realizó *in situ* con una salida técnica en campo, en la cual se definió la ubicación de los puntos de interés para cobertura vegetal de almohadilla en zonas planas (s) y cóncavas (cc) es decir, por cobertura vegetal y topografía existentes en zona de los valles.

Tras estos criterios, en el presente estudio se estableció 26 puntos de muestreo, complementando con 29 puntos obtenidos de estudios previos de Contreras & Fernández (2021). Finalmente se añadieron los puntos de muestreo al mapa, utilizando el software QGIS, tal como se observa en la Figura 7.

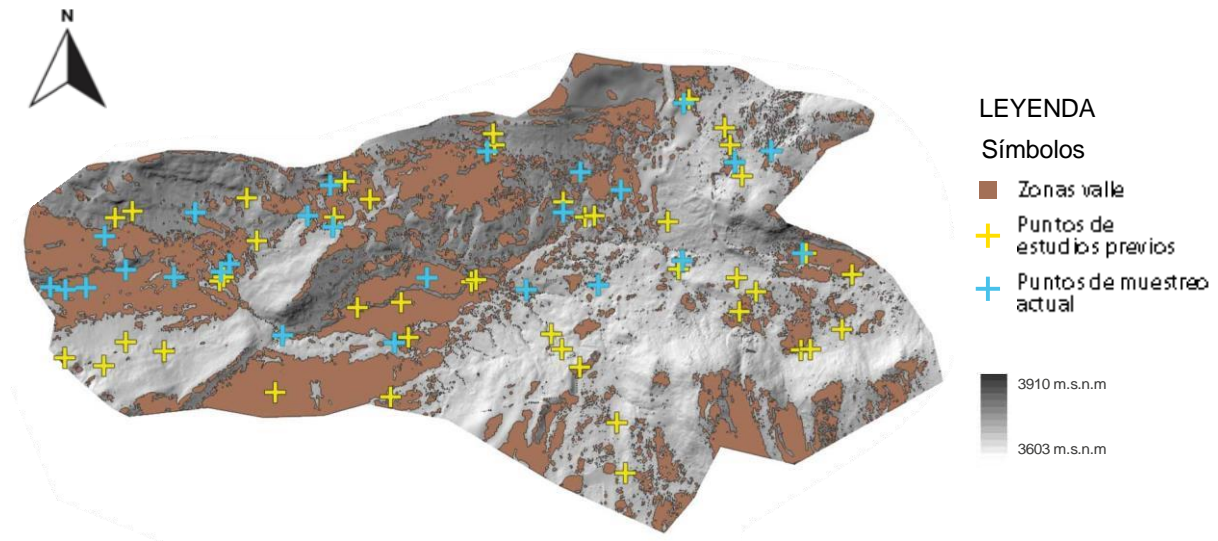


Figura 7. Puntos de Muestreo en almohadillas.

Por otra parte, para el análisis del contenido de carbono orgánico relacionado a los tipos de cobertura vegetal, se consideró 70 puntos de almohadillas entre zona plana (s), convexa (cx) y cóncava (cc) y 45 puntos correspondientes a la cobertura vegetal de pajonal previamente estudiados por Contreras & Fernández, (2021), sumando un total de 115 puntos respectivamente representados y categorizados en la Figura 8.

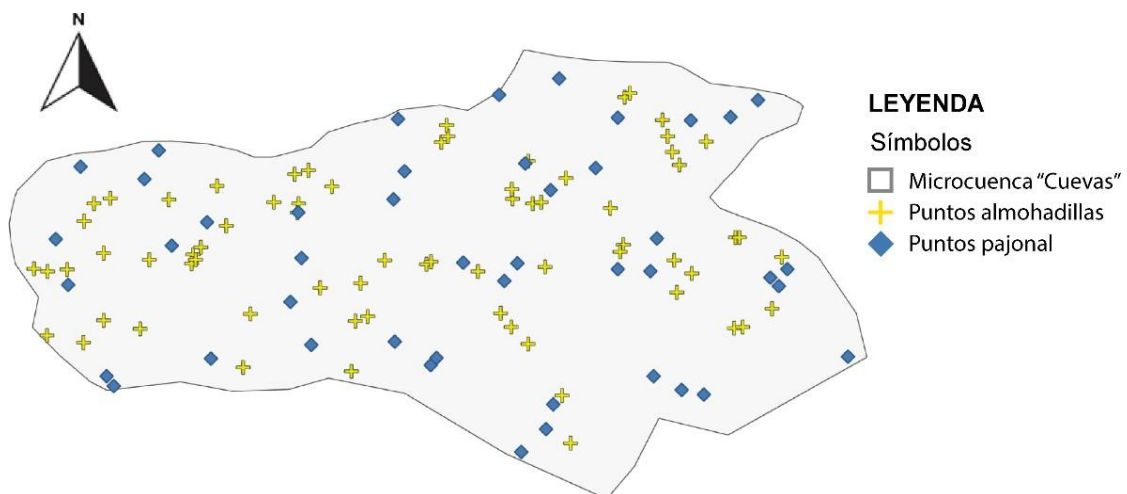


Figura 8. Mapa general de puntos analizados.

### 3.3. Muestreo de Suelo

Establecido los puntos de muestreo en campo, con ayuda de un GPS se llevó a cabo una campaña para la toma de muestras de suelo únicamente en los 26 puntos previamente seleccionados para este estudio. El objetivo fue determinar del contenido de carbono orgánico en relación a la cobertura vegetal, profundidad de los suelos, definir los horizontes en cada perfil, y la profundidad de cada horizonte, incluidos H, A, AC, CA y C.

### 3.4. Procedimiento de Muestreo

Una vez establecidos los puntos de muestreo, se procedió a la recolección de muestras de suelo siguiendo un procedimiento estandarizado, se empleó un barreno de media caña de aproximadamente 1.20 m de altura, perforando hasta alcanzar el horizonte C, o hasta la máxima profundidad que el barreno permitiera, obteniendo muestras de suelo de los diferentes horizontes para cada punto, ver Figura 9.

### 3.5. Medición de la profundidad del suelo y sus horizontes

Las muestras de suelo se tomaron en campo utilizando el barreno de media caña, posterior a ello de manera visual se identificó la presencia de los diferentes horizontes y con ayuda de un flexómetro se midió la profundidad de cada horizonte, hasta llegar al horizonte C o la máxima profundidad alcanzable en cada punto (Figura 9). En 6 puntos de muestreo el horizonte A predominaba superando el metro de profundidad, lo que dificultó llegar al horizonte C. Además, en cada punto de muestreo se registró la inclinación y dirección del terreno, con un inclinómetro y brújula respectivamente (Anexo 1).

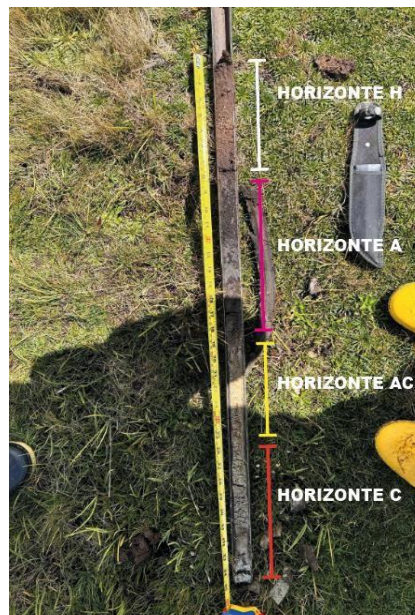


Figura 9. Medición de la profundidad de los horizontes.

### 3.6. Transporte de las muestras al laboratorio

Todas las muestras obtenidas en el área de estudio se trasladaron al laboratorio de Hidrofísica de Suelos del "PROMAS" - Universidad de Cuenca para el almacenamiento, secado y preparación.

### 3.7. Preparación de las muestras de suelo y ensayos de laboratorio

#### 3.7.1. Preparación y secado de las muestras

En la Figura 10 se explica mediante un diagrama de flujo el procedimiento realizado en el laboratorio, para la preparación y secado de las muestras.

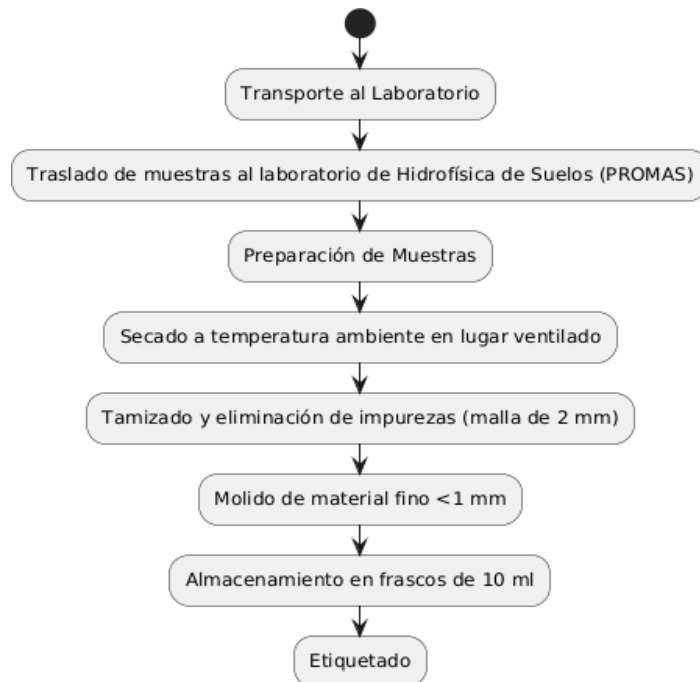


Figura 10. Diagrama de flujo preparación y secado de las muestras de suelo.

Las muestras de suelo se colocaron en recipientes de aluminio con su respectiva identificación, en un lugar ventilado y sin radiación solar directa para secar a temperatura ambiente como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Secado de las muestras de suelo en el laboratorio.

Una vez secas las muestras, se tomó una fracción de cada muestra de suelo seco, se eliminaron impurezas como ramas, raíces, piedras etc., posterior a esto, se realizó el tamizaje en una malla de 2 mm donde se clasificó en material fino y grueso (Figura 12).



*Figura 12. Tamizaje y molido de muestras secas.*

El material fino resultante al pasar por el tamiz, se molió en un mortero hasta obtener un polvo fino inferior a 1 mm de diámetro. Luego, este material se colocó en frascos de plástico con una capacidad de 24.5 cm<sup>3</sup> (Figura 13). Finalmente, estos frascos se empaquetaron en un contenedor, de tal manera que se preservan las muestras de la mejor manera, luego se envió para el análisis al Departamento de Tierra y Ciencias Ambientales de la Universidad Católica de Lovaina en Bélgica, donde se determinó el contenido de carbono orgánico.



*Figura 13. Preparación de las muestras de suelo y etiquetado.*

### **3.7.2. Análisis químico del suelo**

El análisis químico se basó en protocolos establecidos por Pansu & Gautheyrou (2007) y por el Laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Cambridge (s. f.), y la Universidad Católica de Lovaina - La Nueva en Bélgica para este procedimiento se emplearon muestras

alteradas, previamente trituradas y se determinó el contenido de carbono orgánico, carbono total y nitrógeno total con el equipo LECO CN928 analyzer.

Este método fue utilizado para la determinación precisa del contenido de carbono y nitrógeno. Metodología que se basa en la combustión completa de la muestra de suelo a altas temperaturas aproximadamente 950 °C, en presencia de oxígeno. Durante este proceso, el carbono contenido en la muestra pasa a formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), así como también el nitrógeno pasa a formar óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Con ayuda de un sensor infrarrojo, se detectaron los gases de CO<sub>2</sub> y la conductividad térmica para el nitrógeno, permitiendo así un análisis preciso y resultados rápidos.

### **3.7.3. Obtención de valores de densidad aparente**

El proyecto de investigación ParamoSus, proporcionó una base de datos que contiene información sobre el carbono orgánico y densidad aparente en puntos de muestreo ubicados dentro de la misma microcuenca “Cuevas”, en contextos similares a los puntos faltantes dentro de este estudio. La interpolación de los valores de densidad aparente se realizó por horizonte, en este caso, para: H, A, AC y CA, esto debido a que cada horizonte presenta densidades diferentes, para obtener valores representativos y válidos, este análisis debe considerar solo valores de densidad aparente del mismo horizonte.

Para obtener la densidad aparente se realizó la interpolación mediante el software Qgis, se empleó la técnica por distancia inversa ponderada (IDW, Inverse Distance Weighted), con el objetivo de hallar los valores faltantes de la densidad aparente para 26 puntos de almohadillas en suelo de valles, esta herramienta ayudó a encontrar los valores de la densidad aparente según la proximidad espacial a valores de densidad que tienen las mismas condiciones, fortaleciendo una estimación coherente de la variable.

Se crearon 4 bases de datos, una para cada horizonte H, A, AC y CA, entre los datos de estudios anteriores y los datos faltantes de densidad aparente, es decir los valores a rellenar, con estas bases de datos se procedió con la interpolación (Figura 14). Luego, se extrajo los valores de interés, este proceso se repitió de igual manera para cada horizonte.

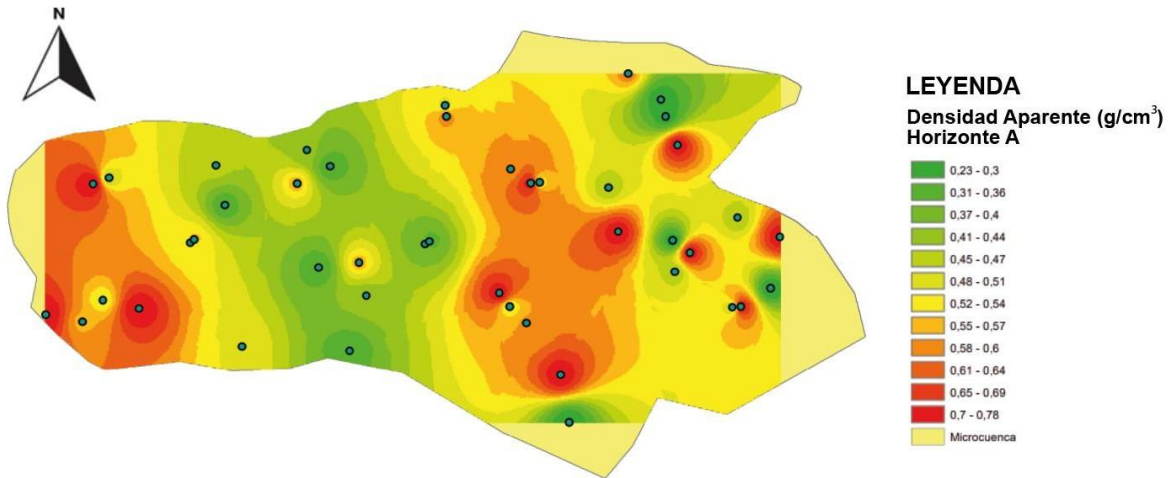


Figura 14. Interpolación de la densidad aparente del horizonte A.

La integración de los datos de campo, a la base de datos proporcionada y los resultados obtenidos mediante interpolación, forman una base más robusta y confiable. Estos valores son necesarios para el cálculo del “Almacenamiento de Carbono en el Suelo en toneladas por hectárea”.

#### 3.7.4. Análisis de carbono en el suelo

Para este cálculo se empleó la fórmula propuesta por Tonneijck et al. (2010), la cual permite determinar la cantidad de carbono orgánico en las muestras de suelo, utilizando el contenido de carbono, densidad aparente y profundidad del suelo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

*Ecuación 1. Almacenamiento de carbono en el suelo*

$$TCS = \sum_{i=1}^{i=k} C_i \times D_i \times b\rho_i \times 10$$

donde:

TCS: almacenamiento de COT (T/ha) sobre la profundidad  $d$ .

$b\rho_i$  : Densidad aparente en el suelo (g/cm<sup>3</sup>) de la capa  $i$ ,

$C_i$  = Carbono de la capa  $i$  (kg kg<sup>-1</sup>),

$D_i$  : Profundidad de la capa  $i$  (cm).

Para este cálculo se tomó en cuenta los horizontes H, A, AC y CA de cada perfil de suelo, pues estos representan la acumulación de carbono orgánico resultante de los procesos

actuales de formación del suelo. Por otro lado, se excluyó el horizonte C, ya que este no forma parte del análisis (Tonneijck et al., 2010).

### 3.7.5. Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico, se creó una base de datos, a partir de los resultados de carbono orgánico obtenidos en el laboratorio. En primer lugar, se realizó una interpolación de los datos para obtener la distribución espacial del contenido de carbono relacionando con la cobertura vegetal, esto mediante el software Qgis, utilizando la función IDW (3D Analyst), la cual permitió obtener el mapa, que indica la distribución espacial de la variable C, en la microcuenca.

Se realizó un análisis descriptivo para la variable Carbono Total en el Suelo (TCS), con el objetivo de obtener medidas estadísticas básicas como: media, mediana, mínimos y máximos. Este análisis descriptivo permitió obtener una visión general del contenido de carbono total en el suelo (TCS), caracterizando su tendencia central, dispersión y rango.

Además, se generaron Boxplot para comparar visualmente la distribución de TCS entre las categorías de cobertura vegetal. Esto permitió identificar posibles diferencias o patrones relacionados con la cobertura vegetal, se evaluó la normalidad de los datos, mediante el software RStudio 4.4.1, se realizaron histogramas para observar gráficamente la distribución de TCS. Luego, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Luzuriaga et al., 2023), la cual plantea las siguientes hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula: Distribución normal de la variable ( $p$  valor  $>$  alfa).
- Hipótesis alternativa: Distribución no normal de la variable ( $p$  valor  $<$  alfa).

Donde alfa representa el nivel de significancia del 0.05, indicando un riesgo del 5% de concluir que existe una diferencia cuando en realidad no la hay (Bautista et al., 2020). Además, para los datos que no presentaron una distribución normal aplicando la prueba de Shapiro-Wilk, se analizaron mediante pruebas no paramétricas con la mediana como medida de centralización (Luzuriaga et al., 2023).

La comparación entre grupos analizó las diferencias significativas en el contenido de carbono entre tipos de cobertura vegetal. Aunque inicialmente se evaluaron las medias con la prueba t de Student, la falta de normalidad en los datos impulsó a utilizar la prueba no paramétrica de Mann-Whitney-Wilcoxon (Alías et al., 2022). Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ , considerando como estadísticamente significativos los valores de  $p < 0.05$  tras la corrección de Bonferroni (Bautista et al., 2020).

#### 4. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1, en la que se presentan los valores promedio por categoría de cobertura vegetal, considerando variables como la profundidad total (Prof.), el porcentaje de carbono en los horizontes (H, A, AC y CA), la densidad aparente, y el almacenamiento total de carbono en el suelo (TCS) en porcentaje y en relación al área (t/ha).

Tabla 1. Características físicas y químicas de muestras de suelo.

Código id	Cobertura Vegetal	H (%C)	A (%C)	AC (%C)	CA (%C)	TCS (%C)	Prof. (m)	TCS (t/ha)
ALM_01	Almohadilla	23.8	5.15	1.76	NA	30.71	0.73	233.49
ALM_05	Almohadilla	36.2	13.8	6.68	NA	56.68	0.66	606.56
ALM_10	Almohadilla	34.8	12.6	NA	NA	47.4	0.56	326.72
ALM_15	Almohadilla	25.4	6.09	NA	NA	31.49	0.29	120.54
ALM_20	Almohadilla	40.8	24.3	NA	NA	65.1	0.62	557.99
ALM_25	Almohadilla	24.7	19.3	NA	NA	44	0.31	290.00
CX_ALM_05	Almohadilla	21.22	9.47	1.69	NA	32.38	1.83	926.30
CX_ALM_10	Almohadilla	21.22	4.80	NA	NA	26.02	1.56	426.36
CC_ALM_01	Almohadilla	21.22	7.18	NA	NA	28.4	0.4	109.42
CC_ALM_07	Almohadilla	28.21	10.79	NA	2.37	41.37	0.82	403.63
CC_ALM_14	Almohadilla	28.21	9.66	3.02	NA	40.89	0.84	417.77
S_ALM_01	Almohadilla	28.21	22.46	NA	NA	50.67	0.42	579.73
S_ALM_07	Almohadilla	28.21	3.29	NA	1.36	32.86	0.65	180.46
S_ALM_14	Almohadilla	28.21	24.83	7.1	NA	60.14	0.84	580.45
CX_PAJ_01	Pajonal	16.44	3.77	NA	NA	20.21	0.54	263.99
CX_PAJ_07	Pajonal	16.44	9.54	2.45	NA	28.43	0.67	246.53
CX_PAJ_14	Pajonal	16.44	12.41	NA	NA	28.85	0.64	348.29
CC_PAJ_01	Pajonal	10.15	9.85	NA	NA	20	0.33	191.16
CC_PAJ_07	Pajonal	10.57	8.64	4.28	NA	23.49	0.45	288.07
CC_PAJ_14	Pajonal	10.57	11.99	4.28	NA	26.84	0.59	370.39
S_PAJ_01	Pajonal	10.57	16.11	NA	NA	26.68	0.88	240.23
S_PAJ_07	Pajonal	10.57	13.24	5.12	NA	28.93	0.75	344.42
S_PAJ_14	Pajonal	10.15	6.75	1.92	NA	18.82	0.38	126.08
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Nota: C. Vegetal = tipo de cobertura vegetal; %C= porcentaje de carbono orgánico; Prof. Total= profundidad límite con horizonte C (m); TCS= Almacenamiento de carbono en el suelo (t/ha); Letra H refiere a horizonte H; letra A refiere a horizonte A; AC refiere a horizonte de transición AC; CA refiere

*a horizonte de transición CA; letra S refiere a topografía plana; CC refiere a topografía cóncava; CX refiere a topografía convexa.*

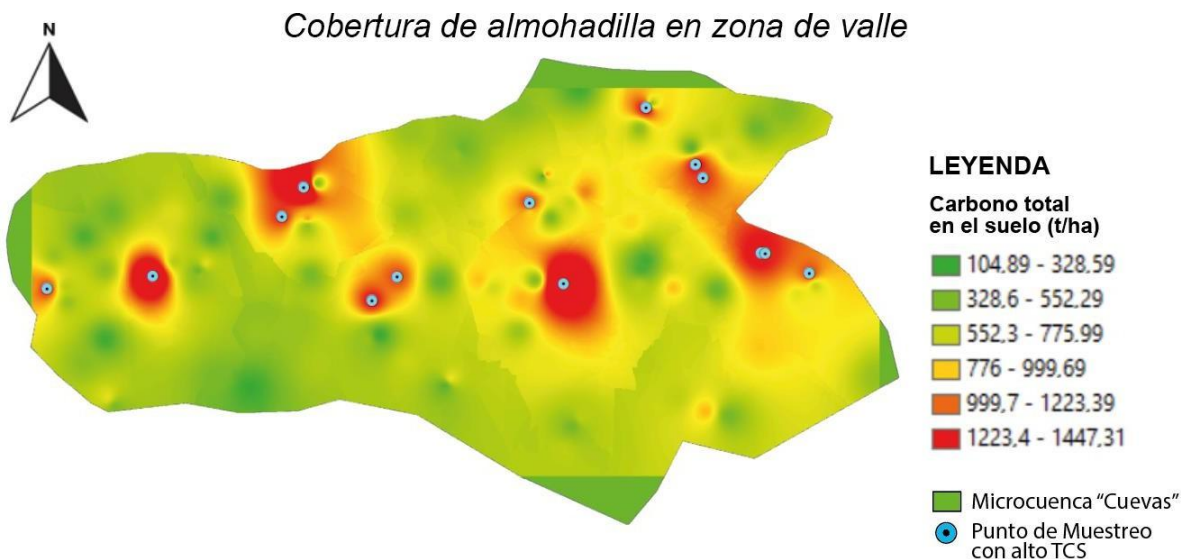
Los valores obtenidos luego de aplicar la interpolación de la densidad aparente entre los puntos estudiados previamente por Contreras y Fernández (2021) y el presente estudio de 26 puntos de almohadillas, brindó una base sólida para la obtención del almacenamiento de carbono en el suelo (TCS). El cálculo del TCS se realizó tomando en cuenta la profundidad hasta antes del horizonte C, ya que este se excluyó del cálculo final debido a sus bajos niveles de carbono.

Posteriormente, se realizó gráficos Boxplots para ilustrar los valores máximos, mínimos, medianas, cuartiles y valores atípicos relacionados con la profundidad, el TCS y el porcentaje de carbono en relación a la cobertura vegetal y a los horizontes. Luego, se analizó los suelos con cobertura vegetal de almohadillas en zona de valle, en relación a la profundidad del suelo con respecto al TCS, considerando los horizontes H y A. Finalmente, se realizó la prueba de Shapiro Wilk para cada una de las clases estudiadas, misma que derivó en pruebas paramétricas y no paramétricas tales como Mann-Whitney.

#### **4.1. Distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en almohadillas de zona de valle**

Con 4.2 km<sup>2</sup> de extensión la microcuenca Cuevas presenta 3 tipos de cobertura vegetal (Figura 15), mismas que se componen de: 81% de pajonal (páramo), almohadilla 17.6%, y pequeñas fracciones de bosque nativo de *Polylepis*, alrededor del 2% (Molina et al., 2019). Es importante definir la distribución espacial del almacenamiento de carbono orgánico en los suelos de valle de la microcuenca Cuevas, ya que, en estos suelos es donde se almacena la mayor cantidad de carbono orgánico.

El análisis IDW de la Figura 15 muestra la distribución del carbono orgánico en la zona de valle con cobertura vegetal almohadilla. Se observaron valores de carbono total en el suelo (TCS) que oscilaron entre 104.89 t/ha y 1447.31 t/ha. El análisis indicó una variación significativa en el almacenamiento de carbono, atribuible a diversas dinámicas y procesos naturales relacionados con la acumulación de materia orgánica, así como a factores físicos y biológicos del ecosistema.



*Figura 15. Distribución espacial del carbono orgánico- zona de valle almohadilla.*

A pesar de que la microcuenca se compone mayoritariamente de pajonal (81%), el mapa generado en la Figura 15, mediante interpolación IDW, se realizó únicamente con puntos de áreas planas y cóncavas de almohadillas, ya que fue el objetivo del trabajo de titulación.

El mapa generado mostró una mayor acumulación de carbono en suelos ubicados en valles cóncavos, donde las condiciones hídricas favorecen la retención de materia orgánica. Las áreas que presentan menores niveles de carbono son áreas con pendientes pronunciadas, esto debido a la escorrentía y la menor acumulación de materia orgánica, lo que concuerda con la expuesto por Contreras & Fernández (2020), en la misma zona de estudio.

En particular, 14 puntos destacaron con valores superiores a la media de TCS (400.23 t/ha), llegando a valores máximos de 1447.31 t/ha, esto indicó que son suelos con características de turberas, considerando a las condiciones de saturación de agua, suelos profundos, un horizonte H predominante, y baja densidad aparente (Molina et al., 2019), lo que favorece la retención de carbono y la formación de depósitos ricos en materia orgánica. Castañeda (2015), destaca valores de hasta 1573 t/ha en suelos de baja densidad aparente (turbera), cifras que bordean los valores máximos obtenidos en este estudio en áreas saturadas de agua, es decir suelos de turberas (Comas et al., 2017).

Finalmente, esto remarca la importancia de la estructura del suelo y la hidrología en la capacidad de almacenamiento, factores que también son mencionados por Contreras & Fernández (2021), donde se enfatiza la influencia de la cobertura vegetal de almohadilla en suelos profundos y saturados.

#### 4.2. Almacenamiento de carbono orgánico en función de la cobertura vegetal

Para el análisis comparativo del almacenamiento de carbono entre las coberturas vegetales de pajonal y almohadilla, se consideró los 3 tipos de topografía: zonas planas, cóncavas y convexas de donde se obtuvo una base de datos con un total de 115 puntos, 70 de almohadilla y 45 de pajonal.

El análisis entre diferentes coberturas vegetales evidenció una amplia variabilidad en la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo. En el caso de las almohadillas, se registraron valores entre 104.89 t/ha y 1447.30 t/ha. Estos resultados se relacionan con los reportados en estudios realizados en el sur del Ecuador, por Suárez (2016), Contreras & Fernández (2021) y Ayala (2014), quienes también encontraron valores similares. Por otro lado, en el norte del Ecuador, Hribljan (2016) reportó que las turberas, incluyendo almohadillas, pueden alcanzar capacidades de almacenamiento de carbono de hasta 2000 t/ha. Los valores obtenidos evidenciaron una gran variabilidad y con la prueba de Shapiro Wilk (Tabla 2) se encontró que los valores no tienen distribución normal, esto puede atribuirse a condiciones heterogéneas de los suelos, como son la profundidad, densidad aparente del suelo, y las diferencias en la densidad de la vegetación.

Tabla 2. Resumen estadístico TCS vs Cobertura Vegetal.

Parámetros	Almohadilla (t/ha)	Pajonal (t/ha)
<b>MAX</b>	1447.30	429.90
<b>MIN</b>	104.89	126.10
<b>MEDIA</b>	405.38	273.16
<b>MEDIANA</b>	292.90	265.10
<b>Q1</b>	220.40	214.00
<b>Q3</b>	510.40	310.60
<b>Resultados del test de Shapiro-Wilk</b>		
<b>TCS</b>	2.02 E-08	0.3471
<b>(t/ha)</b>	No Normal	Normal
<b>Resultado del test de Mann-Whitney</b>		
<b>P-value</b>	0.1006	

*Nota: %C= porcentaje de carbono orgánico; TCS= Almacenamiento de carbono total (t/ha).*

La cobertura de pajonal mostró valores máximos de 429.90, y mínimos de 126.1 t/ha de carbono almacenado, así mismo, Castañeda & Montes (2017) establecieron rangos similares entre 119 a 397 t/ha de carbono almacenado en suelos de pajonal, siendo estos valores

menores que los de almohadilla, según Molina (2019) puede deberse a factores como suelos poco profundos en comparación con almohadillas, además la descomposición de la materia orgánica en pajonal tiene niveles inferiores de saturación de agua en el suelo, acelerando la mineralización del carbono y limita su acumulación a largo plazo, mismo que fue mencionado por Contreras & Fernández (2021) para la misma zona de estudio.

Además, se realizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney entre coberturas, obteniéndose un valor  $p = 0.1006$  (Tabla 2), al comparar las medianas (Tabla 2, Figura 16) se evidenció un 9,5% más de TCS en almohadilla que en pajonal, es decir, no existe diferencias estadísticamente significativas entre los 2 grupos, estos valores al comparar con los obtenidos por Contreras & Fernández (2021) en estudios previos en la misma localidad, así como también Hribljan et al. (2016) y Tonneijck et al. (2010) en estudios realizados al norte del Ecuador, siendo en todos los casos superiores en suelos de almohadilla, esto se debe a condiciones propicias para el almacenamiento de carbono como la saturación de agua y suelos que superan el metro de profundidad. Tonneijck et al. (2010) también señalaron que la saturación de agua afecta positivamente la acumulación de materia orgánica y por ende la retención de carbono.

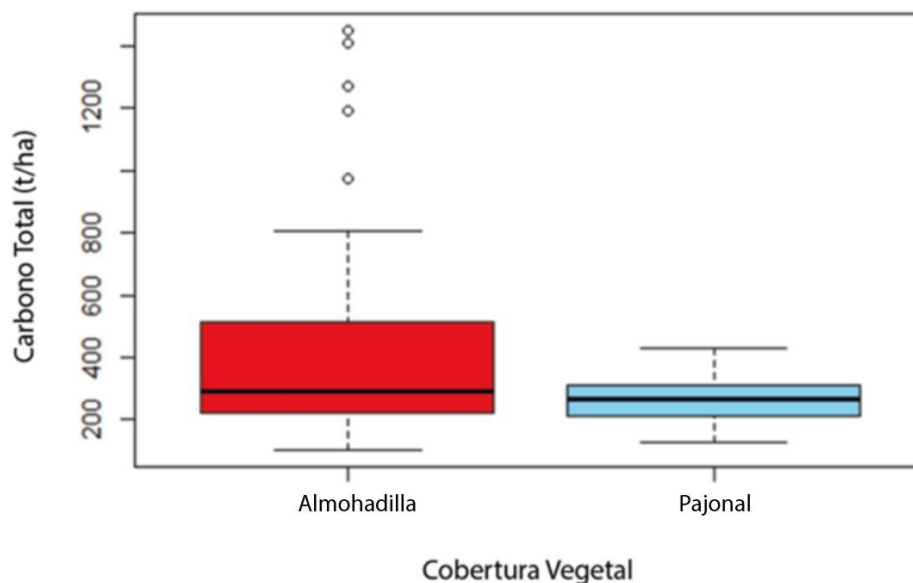


Figura 16. Carbono total en el suelo (t/ha) por Cobertura Vegetal.

Por otro lado, los resultados mostraron que el mayor almacenamiento de carbono se produce en los primeros horizontes H y A de estas coberturas vegetales, esto se respalda y consolida por lo señalado por Castañeda & Montes (2017), quienes reportaron altos valores de contenido de carbono en los primeros 40 cm del suelo en ecosistemas de páramo.

Los estadísticos descriptivos (Tabla 3) del porcentaje de carbono orgánico (%C) evidenciaron diferencias significativas tanto entre horizontes como tipos de cobertura vegetal. El test de Shapiro-Wilk (Tabla 3) del porcentaje de carbono orgánico (%C) reveló que los datos no presentan una distribución normal. Esto se observó tanto en la cobertura de almohadilla como en el pajonal para el horizonte H, mientras que los datos en el horizonte A del pajonal fueron los únicos que cumplieron la normalidad con un valor  $p = 0.85$ ; el horizonte A en pajonales cuenta con niveles de humedad que permiten una actividad microbiana más regular, favoreciendo procesos similares en diferentes puntos de muestreo, además la acumulación de carbono orgánico podría ser menos variable debido a un equilibrio entre la incorporación de residuos vegetales y la descomposición.

Tabla 3. Resumen estadístico para TCS vs Cobertura Vegetal por horizontes.

Parámetros	Horizonte H (%C)		Horizonte A (%C)	
	Almohadilla	Pajonal	Almohadilla	Pajonal
<b>MAX</b>	45.00	16.44	28.90	16.46
<b>MIN</b>	11.00	10.15	2.83	3.77
<b>MEDIA</b>	27.51	13.49	12.67	9.95
<b>MEDIANA</b>	28.21	16.44	10.52	9.85
<b>Q1</b>	21.21	10.57	7.94	8.16
<b>Q3</b>	28.21	16.44	16.65	11.50
<b>Resultados del test de Shapiro-Wilk</b>				
<b>TCS</b>	7.976e-06	6.343 E-09	0.0002862	0.8508
<b>(%)</b>	No Normal	No Normal	No Normal	Normal
<b>Resultado del test de Mann-Whitney</b>				
<b>P-value</b>	2.2e-16		0.09538	

Nota: %C= porcentaje de carbono orgánico; TCS= Almacenamiento de carbono total (%); Letra H refiere a horizonte H; letra A refiere a horizonte A.

En el horizonte H, las medianas del porcentaje del carbono fueron de 28.21% para la cobertura de almohadilla y 16.44% para el pajonal. Se observó una diferencia entre coberturas del 41.72 % y los resultados del test de Mann-Whitney mostraron que hay diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ). Esto indica que la cobertura de almohadilla favorece un mayor almacenamiento de carbono en las capas superficiales del suelo.

En el horizonte A, las medianas del porcentaje del carbono fueron de 10.52% para la cobertura de almohadilla y 9.85% para el pajonal. Se observó una ligera diferencia del 6.36%

y los resultados del test de Mann-Whitney mostraron que esta no fue estadísticamente significativa con un  $p = 0.09$ .

Algo importante a destacar es que el porcentaje de carbono orgánico disminuyó notablemente del horizonte H hacia el horizonte A. Además, tal como menciona Molina et al., (2019) se evidenció que el horizonte A raramente supera el 29%, mientras que en el horizonte superior es más abundante, con una disminución considerable en los horizontes más profundos.

Al comparar los valores de las medianas por cada uno de los horizontes entre las dos coberturas vegetales, se puede apreciar que, tanto para almohadilla como para el pajonal, el contenido de carbono en el horizonte H es superior al contenido de carbono en el horizonte A. Estas diferencias entre horizontes son consistentes con lo mencionado por Contreras & Fernández (2021) en donde mencionan que los procesos de acumulación de materia orgánica se dan más en las capas superficiales y donde las raíces están más concentradas.

En la Figura 17, se muestra que en el horizonte H se encontró los valores más altos de carbono orgánico, en la cobertura de almohadilla, el %C máximo alcanzó un 45%, coincidiendo con lo señalado por Molina et al., 2019, quien observó que los suelos con vegetación de almohadilla pueden contener un promedio de carbono de hasta 45% en el perfil superior, mientras que en el horizonte H del pajonal, el porcentaje de carbono máximo fue notablemente menor, con 16.44%, evidenciando que la cobertura vegetal de almohadilla contribuye a una mayor acumulación de carbono orgánico debido a su estructura densa y retención de agua, en comparación con el pajonal.

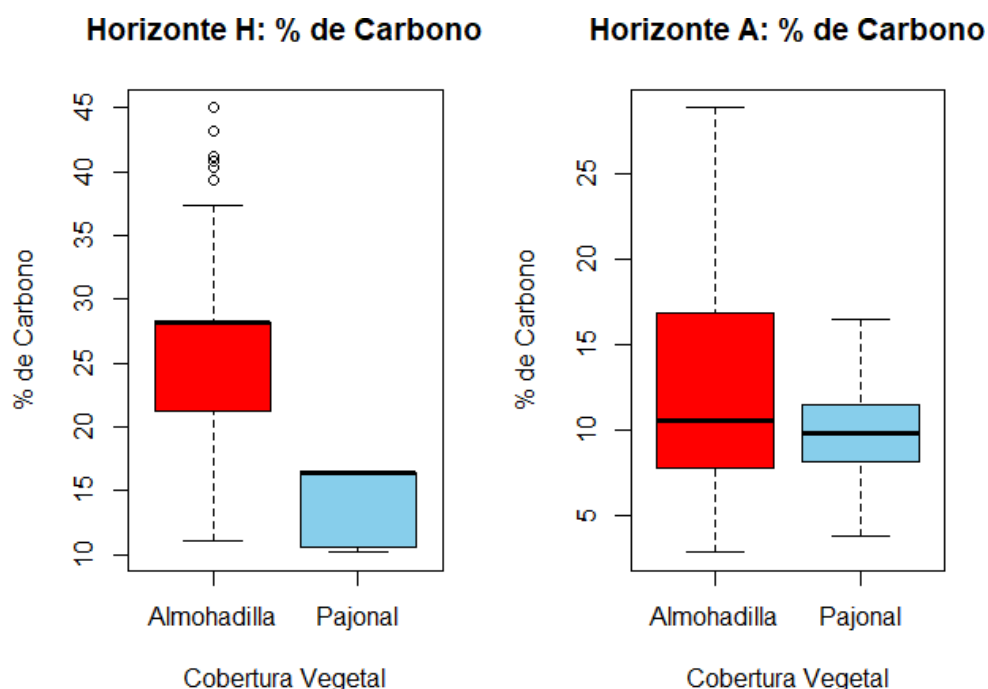


Figura 17. Comparación entre horizontes y cobertura vegetal.

En general, la comparación de medianas entre las coberturas vegetales en el horizonte H indicó una diferencia estadísticamente significativa en el almacenamiento de carbono, mientras que en el horizonte A mostró lo contrario, es decir no hubo una diferencia estadísticamente significativa. Es fundamental considerar la estructura del suelo y la hidrología (suelos profundos y saturados), factores que mencionan Contreras & Fernández (2021) sobre la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo.

La densidad aparente desempeñó un papel clave en la acumulación de carbono orgánico. En la Tabla 4, para el pajonal, la densidad aparente en los horizontes H y A fue de 0.49 y 0.68 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Mientras que, para las almohadillas, los valores de densidad aparente en los horizontes H y A fueron 0.18 y 0.52 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. En todos los casos, los resultados obtenidos para almohadilla presentaron densidad aparente más baja que el pajonal. Pinos et al. (2021) mencionaron que los suelos de páramo pueden almacenar hasta 1700 t/ha de carbono en condiciones de baja densidad aparente (0.5 g/cm<sup>3</sup>) evidenciando la mayor importancia de este parámetro en el almacenamiento de carbono, dado que una menor densidad representa mayor porosidad y capacidad de retención de agua, lo que ayuda la acumulación de materia orgánica y la capacidad de almacenamiento a largo plazo.

*Tabla 4. Densidad Aparente de los horizontes por cobertura vegetal.*

	DA_H	DA_A
<b>Pajonal</b>	0.49	0.68
<b>Almohadilla</b>	0.18	0.52

*Nota: DA\_H=densidad aparente horizonte H (g/cm<sup>3</sup>); DA\_A=densidad aparente horizonte A (g/cm<sup>3</sup>).*

#### **4.3. Almacenamiento del carbono orgánico en horizontes del suelo en almohadillas de valles y su relación con la profundidad**

En la cobertura vegetal de almohadilla, el porcentaje de carbono orgánico (%C) reveló variaciones importantes entre los horizontes de suelo. Para el horizonte H, se obtuvo una mediana de 28,21%, con valores entre 45,00 % como máximo y 11,00 % como mínimo. Francisco Haro et al., (2014), Quinteros et al., (2013) y Contreras & Fernández (2021) encontraron valores similares de almacenamiento de carbono en suelos de almohadilla de páramo en Ecuador, con valores máximos de 43,10% de carbono orgánico.

Por otro lado, para el horizonte A la mediana representa el 10.10%, con 28,90% y 2,83 % como máximo y mínimo respectivamente, esto tiene concordancia con lo reportado en estudios realizados en el páramo de Quimsacocha por Borja et al. (2008), donde la materia orgánica en los horizontes superficiales alcanza un 26.5%.

Tras aplicar las pruebas estadísticas, los resultados se muestran en la Tabla 5, donde la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk indicó que ambos horizontes (H y A) presentan distribuciones no normales ( $p < 0,05$ ). Además, la comparación con la prueba de Mann-Whitney resultó en un valor  $p = 2,44 E^{-15}$ , confirmando diferencias estadísticamente significativas en el almacenamiento de carbono orgánico entre estos horizontes.

Tabla 5. Resumen estadístico para %C en los horizontes H y A en cobertura de almohadillas.

<b>Parámetros</b>	<b>H (%)</b>	<b>A (%)</b>
<b>MAX</b>	45.00	28.90
<b>MIN</b>	11.00	2.83
<b>MEDIA</b>	28.33	12.40
<b>MEDIANA</b>	28.21	10.10
<b>Q1</b>	21.36	7.49
<b>Q3</b>	31.65	15.82
<b>Resultados del test de Shapiro-Wilk</b>		
<b>%C</b>	0.00074 No Normal	0.00184 No Normal
<b>Resultado del test de Mann-Whitney entre horizontes</b>		
<b>P-value</b>	2.44 E-15	

*Nota: %C = porcentaje de carbono orgánico; Letra H refiere a horizonte H; letra A refiere a horizonte A.*

Por otro lado, en la Figura 18 se muestra el porcentaje de contribución de los horizontes H y A al total de carbono almacenado en suelos con cobertura de almohadillas en la zona de valles. El porcentaje de contribución de los horizontes fueron 68% y 26.27%, respectivamente, lo que indicó que juntos representan más del 90% del carbono almacenado, destacando que la mayor parte del carbono se debe al horizonte H.

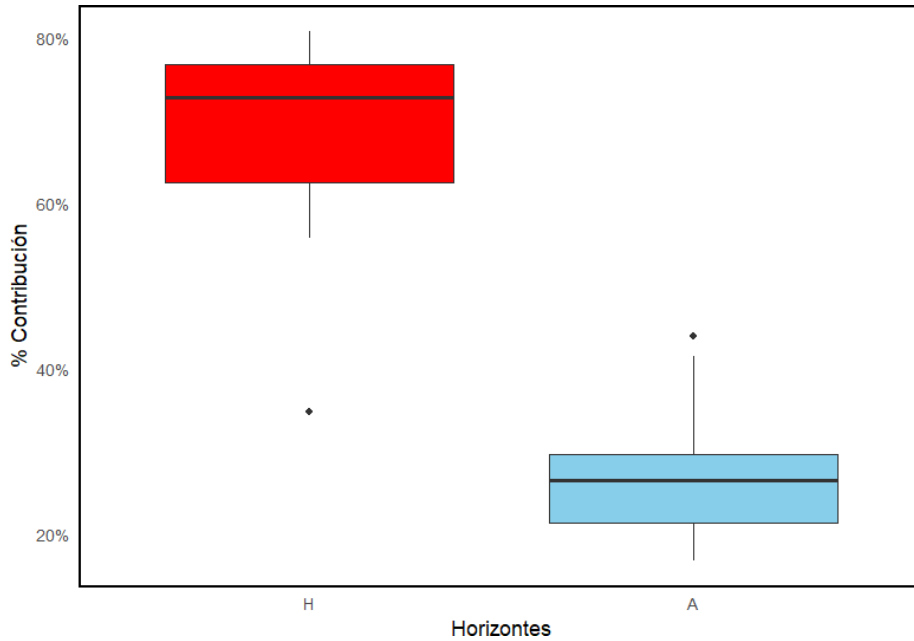


Figura 18. Porcentaje de contribución de los horizontes H y A al TCS de almohadillas.

Por consiguiente, al comparar el contenido de carbono orgánico en los horizontes H y A, en la Figura 19 se observó que existen diferencias estadísticamente significativas entre estos horizontes de almohadilla en la zona de valles, se encontró que el horizonte H contiene una mediana de 28.21% de carbono, es decir 64.20% más que el horizonte A que tiene una mediana de 10.10%.

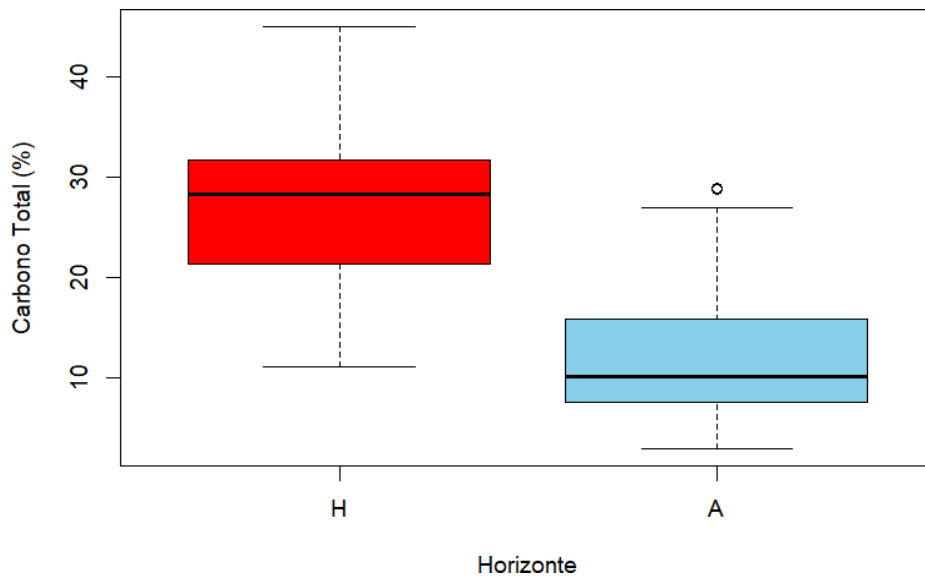


Figura 19. Contenido de carbono orgánico en los horizontes H y A de almohadillas de valles.

Con respecto a la densidad aparente, en la Tabla 6 los horizontes H y A registraron densidades de 0.19 y 0.55 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, la baja densidad aparente del horizonte H permite que el suelo tenga mayor porosidad, acumulando mayor materia orgánica y por ende mayor almacenamiento de carbono orgánico contribuyendo al TCS.

Tabla 6. Densidad aparente en horizontes de almohadillas en zona de valles.

	DA_H	DA_A
<b>Almohadilla de Valles</b>	0.19	0.55

Nota: DA\_H=densidad aparente horizonte H (g/cm<sup>3</sup>); DA\_A=densidad aparente horizonte A (g/cm<sup>3</sup>).

A continuación, en la Figura 20 se muestra el TCS en relación a la profundidad del suelo, es decir, la cantidad de carbono almacenado en el suelo en intervalos de profundidad de 10 cm que van desde 0 cm hasta 80 cm, esto con el objetivo de evaluar la relación entre la profundidad del suelo y el almacenamiento de carbono. Se definió una tendencia evidente a almacenar mayor cantidad de carbono en los horizontes superficiales del suelo, es decir H y A, ya que el gráfico mostró que la mayor cantidad de carbono se almacenó en los primeros 30 cm del suelo, corroborando lo mencionado por Burbano (2018).

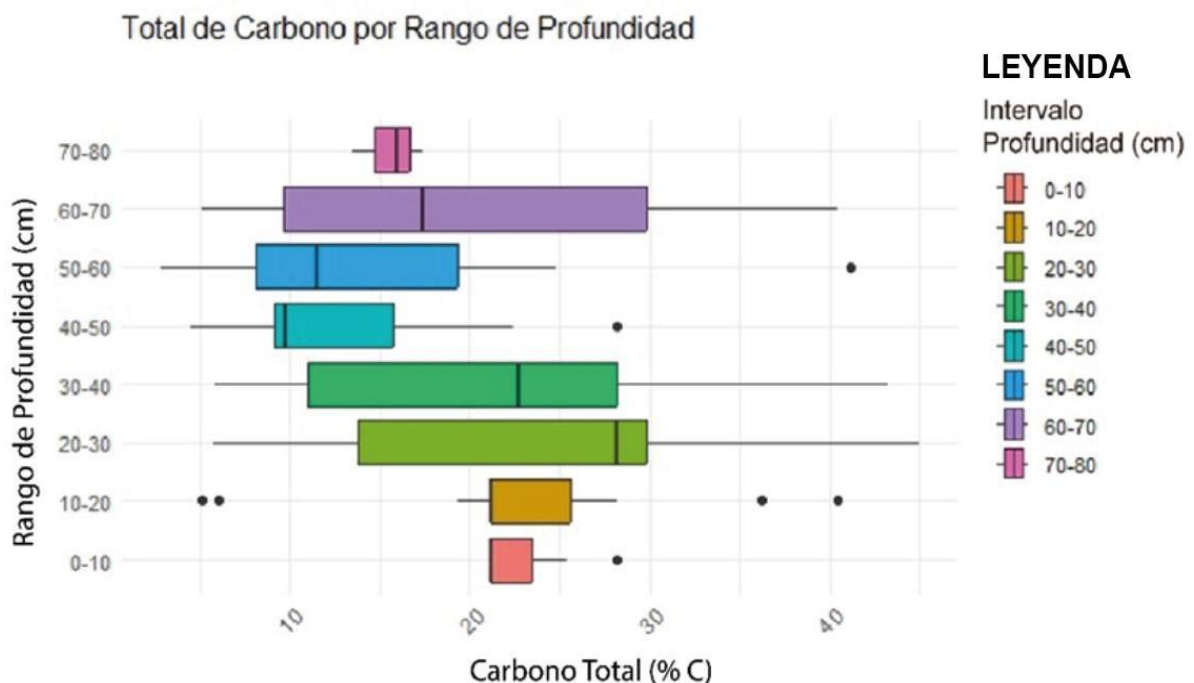


Figura 20. Contenido total de carbono (%) vs Profundidad del suelo (cm).

En la Figura 20, los valores más altos de carbono orgánico en el suelo, superando el 30%, ocurren en el intervalo de 20-30 cm de profundidad, mientras que lo más bajos se observaron después de los 60 cm, a medida que aumenta la profundidad del suelo. Esto indicó que la concentración de carbono disminuye en la transición hacia horizontes minerales, con menor influencia de la vegetación superficial y materia orgánica, en concordancia con el estudio de Carvajal et al. (2009) y Burga Díaz (2019), concluyendo que la profundidad del suelo influyó sobre los contenidos de carbono, encontrando más carbono almacenado en la capa superficial con tendencia a disminuir hacia las capas inferiores, presentando diferencias altamente significativas ( $p < 0,05$ ) entre 0-10, 10-20 y 20-30 cm.

Finalmente, Burga-Díaz (2019), afirma que los factores que contribuyen a la acumulación de carbono orgánico en las capas profundas del suelo incluyen la actividad de la mesofauna y la macrofauna, que transportan residuos orgánicos a lo largo del perfil del suelo, y la precipitación, que causa el arrastre de la materia orgánica desde los horizontes superficiales. Además, la densidad aparente del suelo es el factor crucial para estimar las reservas de carbono orgánico y es el principal responsable de las variaciones en las estimaciones.

## Conclusiones

El propósito de este estudio fue determinar el almacenamiento de carbono orgánico y su dinámica espacial en los suelos de los valles, comparar el contenido de carbono entre la cobertura vegetal de almohadilla y pajonal, además comparar el contenido de carbono entre el horizonte H y A de suelos de valle con cobertura de almohadilla. Los resultados obtenidos evidenciaron que en la microcuenca “Cuevas,” la cobertura vegetal tiene una gran influencia en el almacenamiento de carbono orgánico.

La distribución espacial del TCS en la microcuenca, evidenció que los sitios de mayor almacenamiento de carbono orgánico fueron en la cobertura de almohadilla que presentaron valores máximos de 1447.30 t/ha para el TCS, atribuyendo a zonas de almohadillas y turberas, que destacan en el almacenamiento de carbono por su mayor profundidad y saturación hídrica, contrario al pajonal que registró máximos de 429.90 t/ha para el TCS.

La comparación de las medianas entre coberturas vegetales confirmó que la cobertura de almohadillas tiene un 9.5% más contenido de carbono en comparación con el pajonal. Al analizar el almacenamiento de carbono en los horizontes entre coberturas vegetales, se encontró una diferencia significativa del 41.72% en los horizontes H. En contraste, los horizontes A no mostraron diferencias significativas al ser comparados entre sí.

Por otro lado, los suelos de valles con cobertura vegetal de almohadilla, se observó una diferencia significativa en el contenido de carbono entre los horizontes H y A. El horizonte H destacó como el principal responsable del almacenamiento de carbono con el contener 64.20% más que el horizonte A. El horizonte H aporta el 67.23% del TCS en las zonas de almohadilla. En conjunto, los horizontes H y A contribuyen con más del 90% del TCS en esta cobertura vegetal.

La densidad aparente resultó fundamental en el almacenamiento de carbono orgánico, ya que los suelos con baja densidad aparente son más porosos, facilitando el almacenamiento de carbono en el suelo, esto contribuyó directamente en las zonas de almohadilla, cuyos valores fueron 0.19 g/cm<sup>3</sup> en el horizonte H y 0.55 g/cm<sup>3</sup> en el horizonte A, lo que propició mayor almacenamiento en los suelos de almohadillas.

En cuanto a la profundidad, los valores más altos de carbono orgánico en el suelo, se encontró que entre los 20-30 cm de profundidad (respecto a la superficie) supera el 30% de TCS, mientras que en los intervalos de 60-70 cm y 70-80 cm el %C disminuyó considerablemente a concentraciones máximas del 10% de TCS. Esta tendencia refleja la mayor concentración de carbono en los primeros 30 centímetros del suelo, que es una característica clave de los suelos de páramo.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de los suelos de la microcuenca "Cuevas" como sumideros de carbono, siendo fundamentales para mitigar el cambio climático y el calentamiento global. La cobertura de almohadilla y turberas almacenan grandes cantidades de carbono, evitando que se liberen a la atmósfera, además de contribuir a la estabilización del clima. Estos ecosistemas aportan a la regulación del ciclo hidrológico, mitigando inundaciones y sequías, lo que favorece a la resiliencia del cambio climático. La implementación de estrategias de manejo sostenible y programas de restauración puede garantizar la conservación de estos valiosos ecosistemas a largo plazo. La protección de estos suelos, no solo reduce emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también protege servicios ecosistémicos, importantes para mantener la calidad de vida de la población. Garantizar su preservación asegura beneficios ambientales y socioeconómicos a largo plazo.

### Recomendaciones

- Fortalecer programas de conservación de los ecosistemas de páramo, priorizando zonas de almohadillas y turberas, las cuales aportan con servicios ecosistémicos esenciales.
- Fomentar estudios complementarios que evalúen la dinámica temporal del almacenamiento de carbono en los suelos de páramo, conjuntamente se debe implementar técnicas de manejo sostenible en actividades agrícolas y ganaderas en la región, y llevar un control ante la expansión de la frontera agrícola.
- Debido al apoyo en herramientas informáticas para determinar los puntos de muestreo, se recomienda la verificación *in situ*, de tal forma que los sitios seleccionados correspondan a las condiciones que se busca analizar; caso contrario se requerirá determinar nuevamente el punto de muestreo para cumplir de forma correcta los objetivos planteados.
- A pesar de la restricción de uso de suelo para ganadería por parte de la empresa pública ETAPA EP, se constató que esta disposición no se cumple a cabalidad, esto podría ocasionar cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, alterando así el almacenamiento de carbono en el suelo y causando un impacto ambiental en la zona. Se recomienda analizar el posible efecto a largo plazo en función del cumplimiento o incumplimiento de las medidas de protección dictaminadas por ETAPA EP, empleando la información proporcionada en esta investigación como línea base de la condición actual del suelo en la microcuenca Cuevas.

## Referencias

- Albán, F. (2019). *UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA Proyecto de investigación a la obtención del título de Ingeniero Autor: Auspicio Académico*. <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/51fa25d2-a052-4325-bf1c-08eb88c6c287/content>
- Alías, J. C., Mejías, J. A., & Chaves, N. (2022). Effect of Cropland Abandonment on Soil Carbon Stock in an Agroforestry System in Southwestern Spain. *Land*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/land11030425>
- Amaguaya -Llamuca, J. L. (2015). *Determinación de carbono en el suelo de bosque nativo de ceja andina en el sector Guangra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3883>
- Armero-Estrada, M., & Waldrón Henríquez, T. I. (2018). *Memorias de intercambio binacional de experiencias y aprendizajes en el manejo del páramo y la alta montaña, entre Colombia y Ecuador*.
- Avendaño-Leadem, D., Cedeño-Montoya, B., & Arroyo-Zeledón, M. S. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Geographical Journal of Central America*, 2(65), 63–90. <https://doi.org/10.15359/RGAC.65-2.3>
- Bautista, M. L., Victoria, E., Vargas, L. B., & Hernández, C. C. (2020). Pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas: su clasificación, objetivos y características. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 9(17), 78–81. <https://doi.org/10.29057/icsa.v9i17.6293>
- Bimos, P., & Verdugo, M. (2023). *Soil vegetation water interactions controlling solute flow and chemical weathering in volcanic ash soils of the high Andes*. 27(7), 1507–1529. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1507-2023-supplement>
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). *CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE HISTOSOLES Y ANDOSOLES DE LOS PARAMOS DE QUIMSACocha, ECUADOR*. [https://www.academia.edu/18510773/CARACTERISTICAS\\_FISICO\\_QUIMICAS\\_DE\\_HISTOSOLES\\_Y\\_ANDOSOLES\\_DE\\_LOS\\_PARAMOS\\_DE\\_QUIMSACocha\\_ECUADOR](https://www.academia.edu/18510773/CARACTERISTICAS_FISICO_QUIMICAS_DE_HISTOSOLES_Y_ANDOSOLES_DE_LOS_PARAMOS_DE_QUIMSACocha_ECUADOR)
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/RCIA.183501.85>

- Burga Díaz, E. A. (2019). Determinación del carbono en el suelo del bosque del caserío La Palma, Chadín - Chota. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3543>
- Calispa, M., Samaniego-Eguiguren, P., Santamaría-Freire, S. D., & Vásconez-Paredes, F. J. (2023). Los suelos de los páramos del Ecuador. En *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 40–74). USFQ Press. <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71.c258>
- Camacho, C., Ordoñez, N., Gutiérrez, J., Bolívar, A., Alvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G. F., Bunning, S., & Vargas, R. (2021). Estimation of soil organic carbon in Colombia, a territory management tool. *Ecosistemas*, 30(1). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>
- Campi, K. J. (2023). *La degradación de los suelos Andisoles y su incidencia en sistema de producción agrícola en el Ecuador*. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14872>
- Carmona, J. (2017). *TESIS: ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO Y CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO EN BIOMASA AÉREA, EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA DEL ABRA TANCHIPA, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000763733>
- Carvajal, A. F., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. A. (2009). CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN DIFERENTES USOS DEL TERRENO DE PAISAJES ANDINOS COLOMBIANOS. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 9(3), 222–235. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
- Casco, G. F., & Patiño Pomavilla, L. R. (2021). *Evaluación vertical de los cationes: K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e H<sup>+</sup> en suelos altoandinos de la microcuenca del río Atillo*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15340>
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *ENTRAMADO*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/ENTRAMADO.2017V13N1.25112>
- Chinchilla, M., Mata, R., Alvarado, A., & Rica, C. (2011). *ANDISOLES, INCEPTISOLES Y ENTISOLES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PIRRÍS, REGIÓN DE LOS SANTOS, TALAMANCA, COSTA RICA 1*. [www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr](http://www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr)
- Choque, M. P. (2021). CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Revista Latinoamericana Ogmios*, 1(1), 82–90. <https://doi.org/10.53595/RLO>
- Chuncho, G. (2019). *Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión*. <https://www.researchgate.net/publication/344180955>

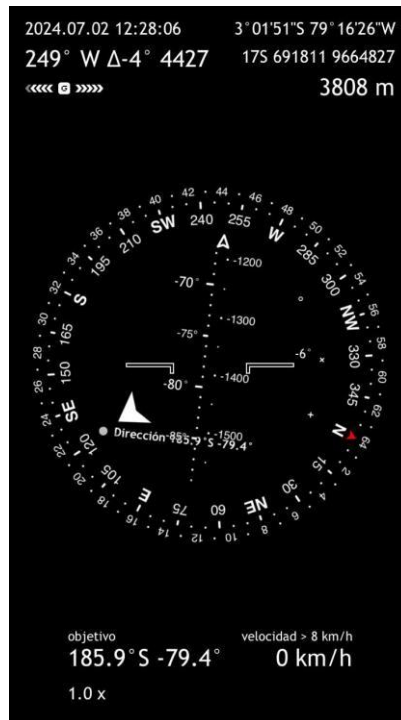
- Comas, X., Terry, N., Hribljan, J. A., Lilleskov, E. A., Suarez, E., Chimner, R. A., & Kolka, R. K. (2017). Estimating belowground carbon stocks in peatlands of the Ecuadorian páramo using ground-penetrating radar (GPR). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(2), 370–386. <https://doi.org/10.1002/2016JG003550>
- Contreras, T., & Fernández, R. (2021). *Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/35693>
- Delgado-Carranza, C., Bautista, F., Calvo-Irabien, L. Ma., Aguilar-Duarte, Y. G., & Martínez-Tellez, J. G. (2017). El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(10), 31–38. <https://doi.org/10.19136/ERA.A4N10.688>
- EPA. (2024, mayo 30). *Emisiones de dióxido de carbono | US EPA*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- FAO. (2017). *CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO potencial oculto el*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>
- Figueredo Pan, J. L. (2019). *Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o comunidades con recursos financieros limitados*. Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/34946>
- Francisco Haro, Magdy Echeverría, Celso Recalde, Washington Logroño, Gina Álvarez, & Hanibal Brito. (2014). *Determinacion-de-carbono-organico-en-el-paramo-de-Pichan-Central-Ecuador*. [https://www.researchgate.net/profile/Washington-Logrono/publication/270453601\\_Determinacion\\_de\\_carbono\\_organico\\_en\\_el\\_paramo\\_de\\_Pichan\\_Central\\_Ecuador/links/55e0a74e08ae2fac471c5433/Determinacion-de-carbono-organico-en-el-paramo-de-Pichan-Central-Ecuador.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Washington-Logrono/publication/270453601_Determinacion_de_carbono_organico_en_el_paramo_de_Pichan_Central_Ecuador/links/55e0a74e08ae2fac471c5433/Determinacion-de-carbono-organico-en-el-paramo-de-Pichan-Central-Ecuador.pdf)
- Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M. del P., Cabrera Cardús, A. J. N., Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M. del P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4–26. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V9I46.134>

- González-Reyes, A. I. (2019). *Modelación de la línea de equilibrio altitudinal (ELA) desde el año A.D. 1500, y variaciones climáticas recientes en los Andes Mediterráneos de Chile (30°-37°S)*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170189>
- Harrison, P., Berry, P., & Dawson, T. (2003). Modelling natural resource responses to climate change (the MONARCH project): An introduction. *Journal for Nature Conservation - J NAT CONSERV*, 11, 3–4. <https://doi.org/10.1078/1617-1381-00032>
- Hofstede, R., Mena-Vásquez, P., & Robalino, E. (2023). *Los páramos del Ecuador Pasado, presente y futuro*.
- Hribljan, J. A., Suárez, E., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2016). Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 113–127. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>
- Huerta, C. (2016). *Hacia una ganadería sustentable y amigable con la biodiversidad. Estudio de caso: Xico, Veracruz*.
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147701>
- Llambí, L. D., Soto Werschitz, A., & Célleri, R. (2012a). *Ecología, Hidrología y Suelos del Páramo*. <https://www.researchgate.net/publication/263280481>
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., & Jiménez, W. (2020). Digital mapping of organic carbon in Ecuador soils. *Ecosistemas*, 29(2). <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- Luzuriaga, H. A., Espinosa, C. A., Haro, A. F., & Ortiz, H. D. (2023). Histograma y distribución normal: Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov aplicado en SPSS. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(4). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i4.1242>
- MAATE. (2018). *AREA NACIONAL DE RECREACIÓN QUIMSACocha*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-002-ANEXO-AREA-NACIONAL-DE-RECREACION-QUIMSACocha.pdf>
- Martínez, E. H., Fuentes, J. P. E., & Acevedo, E. H. (2008). Soil organic carbon and soil properties. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, E., & Silva, I. (2023). *Apoyo técnico e investigativo para la cuantificación de biomasa ingeniería topográfica-ingeniería ambiental*. <http://hdl.handle.net/11349/38403>

- Maza, J. E., Añezco, H. E., Poma Luna, D. A., Luna Florin, A. D., Sánchez Asanza, A. W., Guerrero Azanza, M., Maza Maza, J. E., Añezco Loaiza, H. E., Poma Luna, D. A., Luna Florin, A. D., Sánchez Asanza, A. W., & Guerrero Azanza, M. (2024). Evaluación del contenido de carbono orgánico del suelo en tres ecosistemas de la Reserva Ecológica Arenillas. *Revista Digital Novasinerгия*, 7(2), 52–72. <https://doi.org/10.37135/NS.01.14.04>
- Mena, Patricio. (2011). *Páramo: paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. EcoCiencia : Editorial Universitaria Abya-Yala : ECOBONA.
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., and Balthazar, V.: Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4201–4213. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4201-2015>
- Molina, A., Vanacker, V., Corre, M. D., & Veldkamp, E. (2019). Patterns in Soil Chemical Weathering Related to Topographic Gradients and Vegetation Structure in a High Andean Tropical Ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(2), 666–685. <https://doi.org/10.1029/2018JF004856>
- Montalvo, E. (2021). *Cambio climático y sus afectaciones a los ecosistemas*. EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21319/1/Cambio%20clim%C3%A1tico.pdf>
- Olhoff, A., Bataille, C., Christensen, J., den Elzen, M., Fransen, T., Grant, N., Blok, K., Kejun, J., Soubeyran, E., Lamb, W., Levin, K., Portugal-Pereira, J., Pathak, M., Kuramochi, T., Strinati, C., Roe, S., & Rogelj, J. (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>
- Osorio-Rivera, M. Á., Haro-Altamirano, J. P., Carrillo-Barahona, W. E., & Negrete-Costales, J. H. (2022). *SUELOS CARACTERIZACIÓN E IMPORTANCIA*.
- Osorio, V. (2018). *DOCUMENTACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LOS ECOSISTEMAS NATURALES EN LA GESTIÓN DEL RIESGO*. <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2133/1/Valentina%20Osorio.pdf>
- Paterson, P. (2017). Calentamiento global y cambio climático en Sudamérica. *Revista Política y Estrategia*, N°. 130, 2017, págs. 153-188, 130, 153–188. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6526020&info=resumen&idioma=SPA>

- Pinos, D., Morales, O., Durán, M. E., Pinos, D., Morales, O., & Durán, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 151–173. <https://doi.org/10.15359/RCA.55-2.8>
- Quinteros A., P., Piercosimo, T., & Rafaella, A. (2013). *Comparación química de suelos en distintas coberturas vegetales del PNC mediante métodos de clúster análisis*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11169>
- Rincón, A., Echeverry Duque, M. A., Piñeros Quiceno, A. M., Tapia Caicedo, C., David Drews, A., Arias Arévalo, P., & Zuluaga Guerra, P. A. (2014). *Valoración integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos. Aspectos conceptuales y metodológicos*. 150. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/32547>
- Roux, F. (2013). *Turismo comunitario ecuatoriano, conservación ambiental y defensa de los territorios*. <http://repositoriointerculturalidad.ec/jspui/handle/123456789/31934>
- Sánchez Zavaleta, C. A. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 33(1), 128–138. <https://doi.org/10.17843/RPMESP.2016.331.2014>
- Singh, S., Kiran, B. R., & Mohan, S. V. (2024). Carbon farming: a circular framework to augment CO2 sinks and to combat climate change. *Environmental Science Advances*, 3(4), 522–542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d3va00296a>
- Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). ANALISIS DEL CARBONO SECUESTRADO EN HUMEDALES ALTOANDINOS DE DOS ÁREAS PROTEGIDAS DEL ECUADOR. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171. <https://doi.org/10.21704/REA.V15I2.756>
- Suárez, E., Chimbolema, S., & Jaramillo, R. (2022). *Turberas de páramo en el Ecuador: notas sobre ecología, conservación, y restauración de un ecosistema estratégico*. [https://www.researchgate.net/publication/365676162\\_Turberas\\_de\\_paramo\\_en\\_el\\_Ecuador\\_notas\\_sobre\\_ecologia\\_conservacion\\_y\\_restauracion\\_de\\_un\\_ecosistema\\_estrategico](https://www.researchgate.net/publication/365676162_Turberas_de_paramo_en_el_Ecuador_notas_sobre_ecologia_conservacion_y_restauracion_de_un_ecosistema_estrategico)
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3), 299–315. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)

Anexos



Anexo 1. Georreferencia GPS para puntos de muestreo



Anexo 2. Identificación *in situ* de características de puntos de muestreo.



Anexo 3. Toma de muestra con barreno de media caña.



Anexo 4. Identificación de los diferentes horizontes.