

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Almacenamiento de carbono orgánico en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha**

**Eliana Magdely Coral Paredes**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Medellín, Colombia  
2021

# **Almacenamiento de carbono orgánico en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha**

**Eliana Magdely Coral Paredes**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

Director (a):

Ph.D., Juan Carlos Loaiza Usuga

Codirector (a):

MSc. Jenny Lucia Huertas Delgado

MSc. Tatiana Mallanin Rondón Salas

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Medellín, Colombia  
2021

*A Dios que guía mi camino. A mis papás y abuelos por su amor y cariño infinito. A mis tías Yelena y Adriana por su apoyo incondicional. A Luis Gabriel por ser mi compañero y mi luz.*

## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

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

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

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

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

*Eliana Coral P*

---

Eliana Magdely Coral Paredes

Fecha 25/11/2021

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por la formación académica, pero sobre todo personal.

A mi director y codirectoras de tesis, por su confianza y compartir su experiencia y conocimiento conmigo.

Al Dr. Juan Carlos Loaiza Usuga por su tiempo, orientación y por creer en este proyecto. Por intervenir ante los responsables de los análisis de laboratorio y por toda su dedicación.

A la Mg. Jenny Huertas por su tiempo, acompañamiento en trabajo de campo y por aceptar la codirección de este proyecto de investigación.

A la Mg. Tatiana Rondón, por toda su orientación y apoyo incondicional. Por la bendición que significa para mí conocerla.

A la comunidad del humedal Laguna de la Cocha, Vereda El Motilón, por toda su colaboración y por su amable acogida.

A la Fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres, de la cual soy becaria, por su apoyo en mi proceso de formación.

A la profesora Gabriela Guerrero, Andrés Rosero y Juan Miguel Fernández, por su acompañamiento en el trabajo de campo.

## Resumen

### Almacenamiento de carbono orgánico en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de los ecosistemas andinos, se caracterizan por su alto contenido de carbono orgánico (COS) producto de la acción de los factores formadores de suelo y su génesis. El secuestro de COS es una estrategia importante en la comprensión del papel que desempeña el suelo en la dinámica del clima global, influyendo al mismo tiempo en la salud y calidad del suelo, las cuales pueden medirse a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Con el objetivo de evaluar el almacenamiento de carbono en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha, Departamento de Nariño, se cuantificó la concentración de COS en Andisoles bajo tres condiciones de uso: pasto kikuyo, cultivo de papa y páramo. Mediante un diseño completamente al azar se caracterizó tres perfiles por cada uso de suelo hasta un metro de profundidad, muestreando a 0-5cm, 5-15cm, 15-30cm, 30-50cm, 50-70cm y de 70-100cm. Se encontró que el almacenamiento de COS varió entre 189 Mg C ha<sup>-1</sup> y 542 Mg C ha<sup>-1</sup> de acuerdo con el uso de suelo, siendo el contenido de COS páramo > pasto kikuyo > cultivo de papa. Para los tres usos de suelo estudiados, la mayor concentración de carbono se halla en los primeros 30 cm del suelo. Se evaluó el contenido de materia orgánica, porosidad total, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, porcentaje de arcilla y limo, estos mostraron una correlación significativamente positiva con la acumulación de carbono orgánico, mientras que el porcentaje de arena mostró una correlación negativa. Se observó que variables físicas tales como retención de humedad, estabilidad de agregados y estratificación del COS, están asociadas con una mejor calidad del suelo. La acción antrópica y el uso de suelo influyen en la dinámica del COS y por ende en su salud y calidad. Los efectos adversos de la acción antrópica pueden verse mitigados con el uso de prácticas que mantengan este balance, especialmente aquellas que contribuyan a las propiedades físicas y biológicas del suelo en la capa arable, lo cual tiene un efecto positivo en el almacenamiento de carbono en el suelo.

**Palabras clave:** stock de COS, andisoles, uso de suelo, calidad de suelo.

## Abstract

### Organic carbon storage in soils Ramsar Laguna de la Cocha wetland

Volcanic ash soils (Andisols) of the Andean ecosystems are characterized by their high content of soil organic carbon (SOC) product of the both, action of soil-forming factors and their genesis. SOC sequestration is an important record to understand the soil's role on global climate dynamics, soil health and quality, which can be measured indirectly through its physical, chemical, and biological properties. With the goal of assess the carbon storage in soils of the Ramsar Laguna de la Cocha wetland, Department of Nariño, the concentration of SOC in Andisols was quantified under three conditions of use: kikuyo grass, potato and Andean paramo. Using a completely randomized design, three profiles were characterized in situ for each soil use up to one meter deep, sampling at 0-5cm, 5-15cm, 15-30cm, 30-50cm, 50-70cm and 70-100cm. It was found that the storage of SOC oscillates between 189 Mg C ha<sup>-1</sup> and 542 Mg C ha<sup>-1</sup> regarding the use of the soil, being the content of SOC in Andean paramo greater than pasture grass and potato. The highest concentrations of SOC are found in the first 30 cm of the soil in each condition of use studied. Content of organic matter, total porosity, carbon and nitrogen of the microbial biomass, percentage of clay and silt, were assessed. These parameters showed a positive and significant correlation with the accumulation of COS, the percentage of sand showed a negative correlation. Physical variables such as moisture retention, aggregate stability, and SOC stratification are believed to be associated with a higher soil quality. Anthropoc action and land use influence the SOC dynamics and therefore its health and quality. Adverse effects of anthropic action can be mitigated with the use of practices that manages this balance, especially favoring the physical and biological properties of the soil in the arable layer, which has a positive effect on the storage of carbon in the soil.

**Keywords:** SOC stock, andosols, land use, soil quality.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1. Fundamentos teóricos y características de la zona de estudio.....</b>	<b>3</b>
1.1 La materia orgánica del suelo .....	3
1.2 El carbono orgánico del suelo (COS) .....	5
1.3 Dinámica del carbono orgánico en suelos de páramos y humedales andinos. ...	7
1.4 Área de estudio .....	8
1.5 Localización .....	9
1.6 Clima.....	10
1.7 Suelos.....	10
1.8 Cobertura y uso de suelo .....	11
<b>2. Capítulo 2. Cuantificación de carbono en suelos del humedal Laguna de la cocha</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción.....	13
2.2 Materiales y métodos .....	14
2.2.1 Localización del área de estudio.....	14
2.2.2 Selección del área de estudio y diseño experimental.....	14
2.2.3 Toma y procesamiento de muestras de suelo.....	14
2.2.4 Almacenamiento de carbono orgánico del suelo.....	16
2.2.5 Análisis estadístico .....	17
2.3 Resultados y discusión.....	17
2.3.1 Concentración de carbono orgánico del suelo .....	17
2.3.2 Densidad aparente del suelo .....	19
2.3.3 Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico del suelo	20
2.3.4 Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo.....	22
2.4 Conclusiones.....	24
<b>3. Capítulo 3. Carbono orgánico, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.....</b>	<b>25</b>
3.1 Introducción.....	25
3.2 Materiales y métodos .....	26
3.2.1 Localización del área de estudio.....	26
3.2.2 Toma y procesamiento de muestras de suelo.....	26

3.3	Análisis estadístico .....	28
3.4	Resultados y discusión .....	28
3.4.1	Caracterización de las propiedades químicas del suelo .....	28
3.4.2	Caracterización de las propiedades biológicas del suelo .....	32
3.4.3	Caracterización de las propiedades físicas del suelo.....	35
3.4.4	Relación entre propiedades del suelo.....	38
3.4.5	Análisis de componentes principales de acuerdo al uso de suelo .....	40
3.5	Conclusiones .....	42
<b>4.</b>	<b>Capítulo 4. Cambios edáficos asociados al COS .....</b>	<b>43</b>
4.1	Introducción .....	43
4.2	Materiales y métodos .....	44
4.2.1	Localización del área de estudio .....	44
4.2.2	Toma y procesamiento de muestras de suelo .....	44
4.2.3	Estratificación del Carbono Orgánico del Suelo.....	45
4.2.4	Estabilidad estructural .....	46
4.2.5	Capacidad de retención de humedad.....	46
4.2.6	Análisis estadístico .....	47
4.3	Resultados y discusión .....	47
4.3.1	Relación de estratificación del COS .....	47
4.3.2	Estabilidad estructural de los agregados .....	49
4.3.3	Retención de humedad en el suelo .....	51
4.4	Conclusiones .....	55
<b>A.</b>	<b>Anexo: Descripción de perfiles de suelo .....</b>	<b>57</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Correlaciones entre COS y propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.....</b>	<b>60</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>63</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Ciclo de materia orgánica. ....	4
<b>Figura 2.</b> Transformación de los restos orgánicos en el suelo. ....	5
<b>Figura 3.</b> Ubicación geográfica de la zona de estudio. ....	9
<b>Figura 4.</b> Puntos de muestreo de suelo. ....	15
<b>Figura 5.</b> Porcentaje promedio de carbono orgánico por uso de suelo ....	18
<b>Figura 6.</b> Densidad aparente por uso de suelo ....	20
<b>Figura 7.</b> Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo uso de suelo cultivo de papa. ....	21
<b>Figura 8.</b> Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo uso de suelo pasto kikuyo. ....	21
<b>Figura 9.</b> Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo suelo de páramo. ....	22
<b>Figura 10.</b> Almacenamiento de carbono orgánico por uso de suelo. ....	23
<b>Figura 11.</b> Distribución de poros por uso de suelo ....	38
<b>Figura 12.</b> ACP para las propiedades del suelo bajo condición de cultivo de papa. ....	40
<b>Figura 13.</b> ACP para las propiedades del suelo bajo condición de pasto kikuyo. ....	41
<b>Figura 14.</b> ACP para las propiedades del suelo bajo condición de páramo. ....	41
<b>Figura 15.</b> Relación de estratificación de COS. ....	48
<b>Figura 16.</b> Relación de estratificación y almacenamiento de carbono. ....	48
<b>Figura 17.</b> Distribución de agregados por uso de suelo ....	50
<b>Figura 18.</b> Relación entre agregados estables y almacenamiento de COS. ....	51
<b>Figura 19.</b> Curva de retención de humedad por uso de suelo a 0-5 cm de profundidad. ...	52
<b>Figura 20.</b> Curva de retención de humedad por uso de suelo a 5-15 cm de profundidad. ....	52
<b>Figura 21.</b> Curva de retención de humedad por uso de suelo a 15-30 cm de profundidad. ....	53

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Carbono orgánico en suelos del mundo.....	6
<b>Tabla 2.</b> Uso de suelo ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha. ....	11
<b>Tabla 3.</b> Cobertura vegetal en la ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha .....	12
<b>Tabla 4.</b> Número de muestras de suelo para análisis de concentración de carbono y densidad aparente. ....	15
<b>Tabla 5.</b> Concentración promedio de carbono orgánico por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	19
<b>Tabla 6.</b> Densidad aparente por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	20
<b>Tabla 7.</b> Almacenamiento de COS por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	24
<b>Tabla 8.</b> Número de muestras de suelo para análisis de propiedades físicas y químicas. ....	26
<b>Tabla 9.</b> Número de muestras de suelo para análisis de propiedades biológicas. ....	27
<b>Tabla 10.</b> Métodos utilizados para análisis de propiedades químicas, biológicas y físicas, del suelo. ....	27
<b>Tabla 11.</b> pH del suelo bajo las condiciones estudiadas. ....	29
<b>Tabla 12.</b> Conductividad eléctrica del suelo bajo las condiciones estudiadas. ....	29
<b>Tabla 13.</b> Fosforo disponible ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) del suelo bajo las condiciones estudiadas. ....	30
<b>Tabla 14.</b> Contenido de Nitrógeno (%) del suelo bajo las condiciones estudiadas.....	31
<b>Tabla 15.</b> Contenido de materia orgánica (%) del suelo con diferentes usos estudiados.....	31
<b>Tabla 16.</b> Contenido de biomasa microbiana, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana y relación carbono nitrógeno por uso de suelo.....	33
<b>Tabla 17.</b> Respiración basal, índice y coeficiente metabólico por uso de suelo .....	34
<b>Tabla 18.</b> Densidad real por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	35
<b>Tabla 19.</b> Textura por uso de suelo .....	36
<b>Tabla 20.</b> Clase textural por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	36
<b>Tabla 21.</b> Porosidad total por uso de suelo y profundidad de muestreo.....	37
<b>Tabla 22.</b> Número de muestras de suelo para análisis de indicadores edáficos. ....	45
<b>Tabla 23.</b> Distribución de agregados por uso de suelo y profundidad de muestreo .....	50
<b>Tabla 24.</b> Agua disponible por uso de suelo y profundidad de muestreo .....	54
<b>Tabla 25.</b> Coeficientes de correlación entre retención de humedad a CC y PMP y CO, Da, A, L y Ar.....	55

# Introducción

El incremento de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, potencializan el cambio climático global. Sin embargo, existen sumideros naturales como la biomasa vegetal, el océano y el suelo, que almacenan carbono mitigando estos efectos [1]. Este último se constituye como un recurso fundamental, desde perspectivas ecológicas y humanas por la provisión de servicios ecosistémicos, entre ellos producción alimentaria, seguridad hídrica y resiliencia ante el cambio climático.

El carbono orgánico contenido en el suelo (COS), es un indicador de la salud y calidad del suelo, contribuyendo a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Según el Protocolo de Kioto [2], es importante conocer y analizar la dinámica del COS teniendo en cuenta el uso de suelo y sus cambios de uso, razón por la cual la captura y almacenamiento de COS ha sido evaluada en diversos escenarios ecosistémicos [3].

Es el caso de los ecosistemas de páramo y humedales de alta montaña, reconocidos por almacenar gran cantidad de COS [4][5][6]. En páramos, las bajas temperaturas y condiciones de humedad ralentizan la descomposición de la materia orgánica; para los humedales de montaña se evidencia una baja velocidad de descomposición de materia orgánica por acción de los microorganismos [7] favoreciendo su acumulación. A pesar de su importancia, los asentamientos y desarrollo rural en estas zonas para el Departamento de Nariño, generan efectos perjudiciales al incrementar los fenómenos de erosión y compactación asociados a los cambios en uso del suelo de bosque natural a cultivo y pasturas, eliminando la cobertura vegetal natural, afectando la calidad del suelo e influyendo de manera directa en el almacenamiento de COS [8].

Los suelos del ecosistema andino nariñense están desarrollados sobre cenizas volcánicas, caracterizados por poseer propiedades ándicas [9], la materia orgánica tiene presencia de arcillas no cristalinas (arcillas amorfas tipo alófana e imogolita) y cationes polivalentes, los cuales favorecen la formación de microagregados con microestructuras migajosa y bloques subangulares que permite al COS ser altamente resistente a la actividad microbiana [10].

Esta investigación tiene como finalidad conocer cómo los diferentes usos de suelo evaluados en el humedal Ramsar Laguna de la Cocha, influyen en el almacenamiento de COS, identificando los procesos y factores involucrados, buscando responder a la pregunta de investigación ¿Cuál es la variación del almacenamiento de carbono en el humedal Ramsar Laguna de la Cocha bajo diferentes usos de suelo?

Por lo anterior, se propone como objetivo general de la investigación, evaluar el almacenamiento de carbono en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha, bajo diferentes usos de suelo. Como objetivos específicos: a). Cuantificar el almacenamiento de carbono bajo uso de suelo pasto, cultivo y páramo, b). Relacionar la cantidad de carbono contenido en el suelo, en función de sus propiedades físicas, químicas y biológicas y c). Analizar los principales cambios edáficos asociados a las actividades antrópicas, respecto al almacenamiento de carbono bajo uso de suelo pasto, cultivo y páramo.

El primer capítulo de este documento presenta fundamentos teóricos relacionados con materia orgánica de suelo, carbono orgánico en suelo de páramos y humedales altoandinos, y la caracterización de la zona de estudio. El segundo capítulo aborda la cuantificación de carbono orgánico bajo los tres usos de suelo propuestos y las profundidades de muestreo. En el tercer capítulo se establecen y explican las relaciones existentes entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con relación al almacenamiento de COS. El cuarto capítulo analiza los cambios edáficos asociados al COS en función de los diferentes usos de suelo bajo criterios de estratificación de carbono orgánico, estructura del suelo y retención de humedad.

# 1. Capítulo 1. Fundamentos teóricos y características de la zona de estudio.

## 1.1 La materia orgánica del suelo

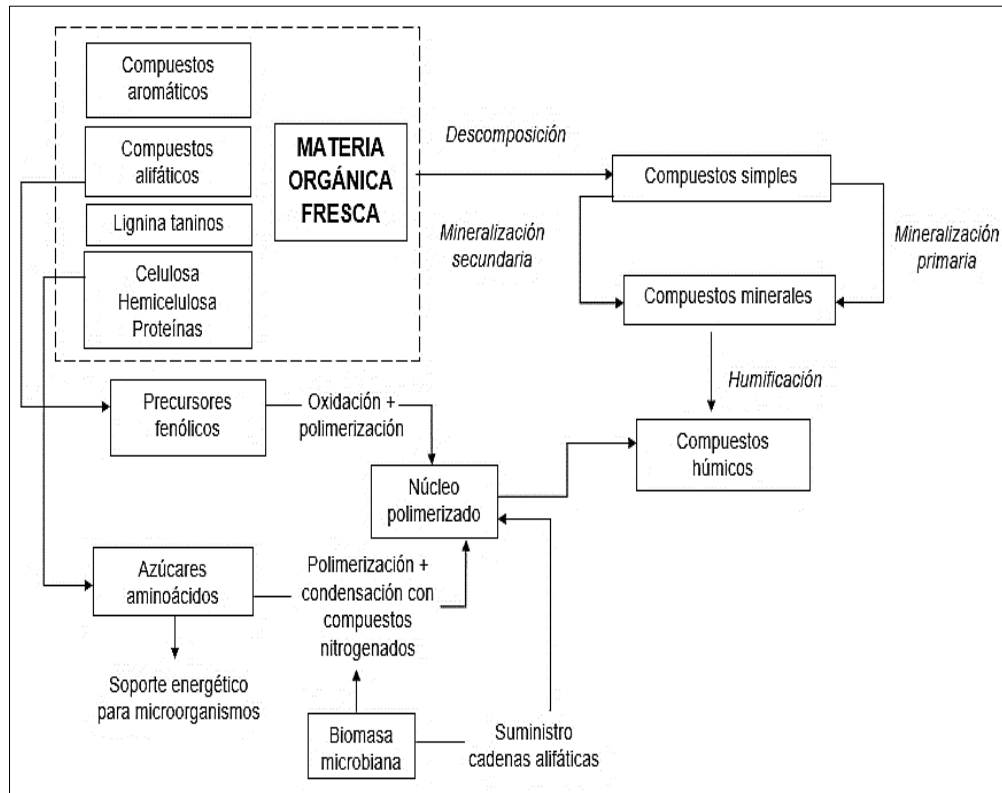
La materia orgánica del suelo (MOS) está constituida por un grupo heterogéneo de sustancias formadas por la acumulación de residuos provenientes de plantas, animales y microorganismos en diversas etapas de descomposición, que consisten en biomoléculas de Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S) y Fósforo (P), agrupados en compuestos orgánicos [11]. La mayoría de estos compuestos son utilizados como fuente de energía y nutrientes para el crecimiento microbiano [12], y su contenido varía dependiendo de factores naturales (topografía, vegetación y clima) y antrópicos (fertilización, labranza y uso del suelo) [13][14].

Dentro del ciclo de la materia orgánica se encuentran procesos como descomposición, humificación y mineralización (Figura 1) estos dos últimos favorecen la migración de fracciones de carbono en el suelo y la transformación de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y compuestos minerales básicos; su máxima concentración se presenta en los primeros centímetros de la capa del suelo u horizonte superficial y generalmente disminuye con el aumento de la profundidad, variando entre un 90% para suelos turbosos a trazas en suelos desérticos [15]. La MOS está compuesta por 55%-60% de C en masa, comprendiendo casi la totalidad de la reserva de C del suelo [16], cuyo nivel máximo depende del uso del suelo y en muchos casos del manejo de cultivo [11][17].

Según Aguilera [18] la MOS se clasifica en biótica y abiótica, la biótica está compuesta por organismos vivos que representan menos del 1% de la MOS, sin embargo, son los responsables de toda actividad que da lugar a la disponibilidad de nutrientes y génesis de suelo; la materia orgánica abiótica conocida como lábil, es considerada estable, polimérica y compleja, representa cerca del 85% de la MOS y se encuentra disponible como fuente de energía, la cual se divide en fracción liviana (FL), fracción pesada (FP) y biomasa microbiana (BM) dependiendo del fraccionamiento físico-biológico [10].

La fracción liviana, se encuentra protegida por los microagregados del suelo y está conformada por residuos en descomposición con tamaños superiores a  $250\ \mu\text{m}$  [19]. La fracción pesada corresponde a aquella MO asociada a los agregados tamaño arena, limo y arcilla, subdividida en no húmicas, como carbohidratos, lípidos, proteínas y pigmentos y

húmicas: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas, estas últimas constituyen la principal reserva de carbono orgánico en los suelos [20]. La biomasa microbiana corresponde entre 1% a 3% del COS, no obstante es clave en la descomposición de la MOS y el suministro de nutrientes para las plantas [21].



**Figura 1.** Ciclo de materia orgánica.

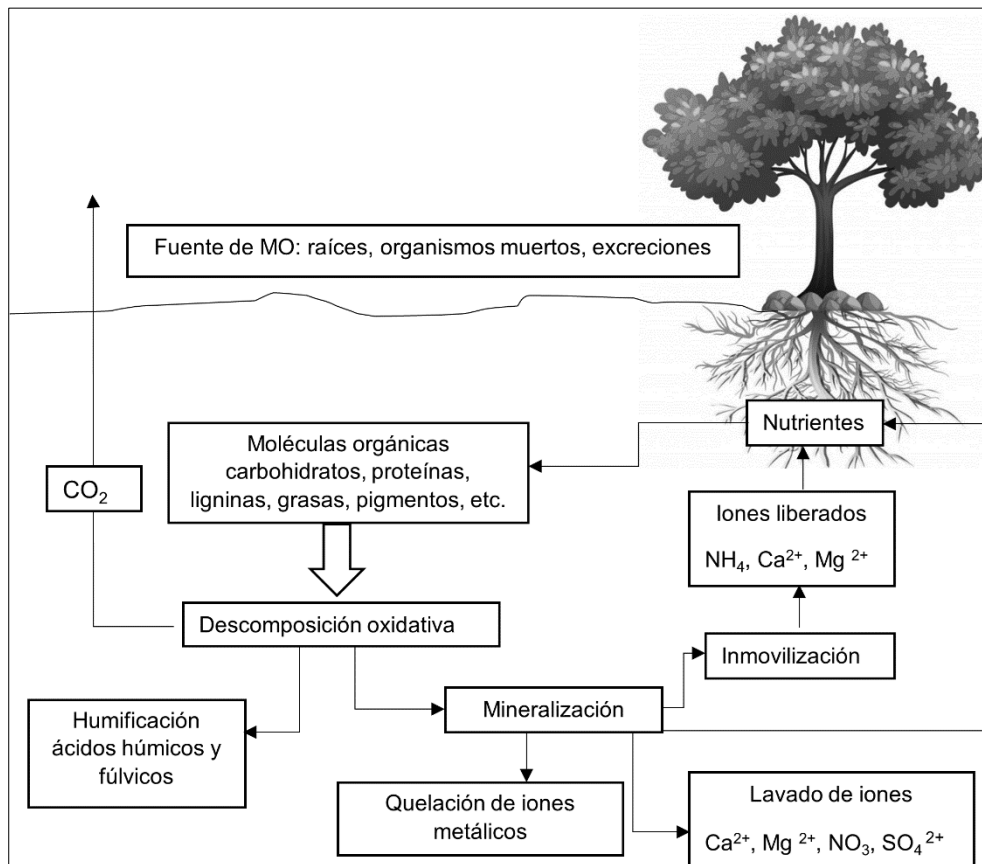
Fuente: Adaptado de Herrero, 2004

Actualmente se considera a la MOS como un indicador por excelencia de la calidad del suelo debido a su relación con las propiedades físicas, químicas y biológicas [22]. Al respecto, Gallardo et al., [23], afirman que el contenido de materia orgánica mejora la agregación y estructura del suelo a través de uniones con las arcillas y la formación del complejo de cambio, lo que permite la absorción y retención de agua, disminuye el riesgo de erosión, favorece el intercambio gaseoso e incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC), actuando como fuente y sumidero de nutrientes para las plantas y microorganismos [24].

Fassbender & Bornemisza [15] y Góez et al., [25], sostienen que la MOS actúa en la inactivación de plaguicidas a través de fenómenos de adsorción, estabiliza la acidez del suelo e interviene en la volatilización de azufre y nitrógeno; las actividades antrópicas en relación a los usos del suelo, tienen mayor influencia sobre la dinámica de la MOS y sobre los niveles de COS [26].

## 1.2 El carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono se constituye en uno de los compuestos orgánicos fundamentales en el planeta, se almacena en el océano, la atmósfera, los combustibles fósiles, el suelo y la biomasa vegetal [27], y su reserva comprende carbono inorgánico del suelo (CIS) y carbono orgánico del suelo (COS). El CIS se deriva de componentes minerales formados por ausencia de actividad biológica y abunda en regiones áridas y semiáridas [28]; mientras que el COS depende de la incorporación de material orgánico muerto y su transformación por acción microbiana, y la acción de factores como clima, material parental, mineralogía, posición geomorfológica y tipo de residuos vegetales, además de la emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera luego del proceso de mineralización y descomposición de la MOS [27] como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Transformación de los restos orgánicos en el suelo.

Fuente: Adaptado de Zapata, 2017

El almacenamiento de COS a corto o largo plazo depende de su estabilidad fisicoquímica, además de la protección ejercida por los microagregados estables del suelo [29]. De este modo, la reserva rápida de carbono conocida como lábil da lugar a la pérdida de gran porcentaje de la biomasa inicial en 1 o 2 años después de la incorporación del carbono

orgánico fresco, comportándose como un indicador de las propiedades del suelo. La reserva inmediata está compuesta por el por CO estabilizado parcialmente en superficies minerales y su tiempo de rotación varía entre 10 y 100 años. La reserva lenta o estable ingresa en un periodo de muy lenta rotación (100 a 1000 años), siendo importante en el secuestro de COS a largo plazo [30].

El secuestro o stock de carbono terrestre se establece como el proceso de extracción de CO<sub>2</sub> atmosférico y su almacenamiento en un depósito o sumidero (vegetación o suelo) a través de la fotosíntesis [31]. La variación en la dinámica del COS a largo plazo depende en gran medida de factores climáticos y condiciones naturales del suelo; la biología del suelo establece la cantidad y calidad de entradas de carbono al suelo [29]. Por su parte, el cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal influyen en el almacenamiento de COS en periodos más cortos FAO [27].

Según Eswaran et al., [32], los tipos de suelo difieren en el almacenamiento de carbono orgánico, siendo los andisoles el segundo reservorio de carbono más grande después de los histosoles (Tabla 1), debido a su material parental (ceniza volcánica), y las transformaciones asociadas al proceso de andolización [33], el cual está dominado por complejos de MO y silicatos de aluminio amorfos [34].

Los Andisoles son considerados suelos relativamente inmaduros [35] y se caracterizan por presentar densidad aparente baja, alta permeabilidad y porosidad, con alto volumen de poros en los horizontes superiores del suelo [36], alta capacidad de intercambio catiónico, fuerte acidez, alta retención de fósforo, alta acumulación de nitrógeno en su componente orgánico y altos contenidos de hierro y aluminio [33], estas propiedades están asociadas en gran parte a la formación de materiales no cristalinos (alófana, ferrihidrita, imogolita), que permiten la estabilización y acumulación de MO [33].

**Tabla 1.** Carbono orgánico en suelos del mundo

ORDEN	COS/ÁREA GLOBAL (Pg10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
Histosoles	0,205
Andisoles	0,031
Inceptisoles	0,016
Spodosoles	0,015
Molisoles	0,013
Oxisoles	0,010
Entisoles	0,010
Ultisoles	0,009
Alfisolos	0,007
Vertisoles	0,006
Aridisoles	0,003

Fuente: Adaptado de Eswaran et al., 1993

### **1.3 Dinámica del carbono orgánico en suelos de páramos y humedales andinos.**

Los ecosistemas andinos como páramos y humedales son altamente productivos debido a la provisión de servicios ecosistémicos (SE) como regulación de agua, adaptación al cambio climático, soporte de biodiversidad, hábitat de especies y almacenamiento de carbono en suelos y biomasa [4]. Los páramos y humedales andinos son considerados como áreas fundamentales para el secuestro de COS, ya que almacenan entre 60 y 80 Pg de carbono, aproximadamente la misma cantidad que las turberas tropicales [7]. Las condiciones de humedad, temperatura y presión atmosférica en estos ecosistemas permiten la lenta mineralización de la MO, incrementando el tiempo de almacenamiento de carbono en el suelo.

En Colombia los páramos y humedales son escenarios de contextos sociales, económicos e incluso políticos, considerados globalmente como territorios expuestos y vulnerables frente al cambio climático [37]. Los humedales andinos se constituyen como lugares de alta relevancia por su diversidad biológica y su rol en los sistemas productivos de las comunidades locales; hacen parte fundamental de la dinámica de las microcuencas de alta montaña, situados en la transición entre sistemas acuáticos y terrestres, conocidos por su significado social y económico, además de su fragilidad debido al desarrollo de actividades antrópicas [38]. A nivel nacional, la pérdida y transformación de los humedales se debe principalmente a actividades ganaderas (63,7%), deforestación (15,9%) y agricultura (15,3%) [39].

Los humedales pueden clasificarse según su tipo y origen en lagos y lagunas de agua dulce (de origen glaciar, volcánico y tectónico), salares, lagunas saladas y salobres, bofedales y turberas, géiseres y mallines; según el tipo de vegetación, se clasifican en totorales, vegas, chuscales, entre otros [40]. En la región andina colombiana se encuentra una alta variabilidad de humedales dulceacuícolas, divididos en ambientes lacustres de páramo (mayor a 3.300 msnm), ambientes lacustres andinos y subandino (1.100 y 3.800 msnm) y ambientes fluviales, lacustres y palustres tropicales (10 hasta 1.100 msnm) [41].

Los suelos de humedales son considerados como uno de los más grandes sumideros de carbono del mundo junto con las turberas; su almacenamiento depende de la tasa de entrada de materia orgánica producida in situ, y salidas por descomposición [42][43]. Nahlik & Fennessy [44], Suarez et., al [45] y Roa & Brown [46], evidencian en sus investigaciones que la cantidad de COS en humedales es inversamente proporcional a su intervención, cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.

Los páramos son definidos como sistemas tropicales de alta montaña ubicados entre 3.000 y 4.800 msnm, distribuidos de forma particular en Costa Rica y en la Cordillera de los Andes. En Sudamérica, los páramos tienen una extensión de 35.303 Km<sup>2</sup>, siendo Colombia el país con mayor superficie (14.000 km<sup>2</sup>), distribuidos en la Sierra Nevada de Santa Marta y en las Cordilleras Occidental, Oriental y Central [47]. De acuerdo con Rangel [48] los

páramos Colombianos se clasifican según su zona, en franja altoandina (3.000 a 3.200 msnm), páramo bajo o subpáramo (3.200 a 3.500 msnm), páramo típico (3.500 a 4.100 msnm) y superpáramo (superior a 4.100 msnm).

Los páramos andinos presentan gran variedad de lagos, lagunas y turberas, con clima frío y húmedo, cambios de temperatura fluctuante entre 0 a 20°C, con heladas y deshielos; presentan variaciones de temperatura diarias, condiciones cálidas en el día y fría en la noche [49]. Los suelos de páramo son considerados frágiles por su bajo nivel de resiliencia [50]. Los andisoles son los suelos más comunes en los páramos Colombianos, son suelos de origen volcánico, caracterizados por su color negro debido a la interacción de alófanos y MO, cubierta vegetal de flora nativa y gran cantidad de raíces, ricos en humus, homogeneidad, fertilidad, densidad aparente baja y alta porosidad [47][51].

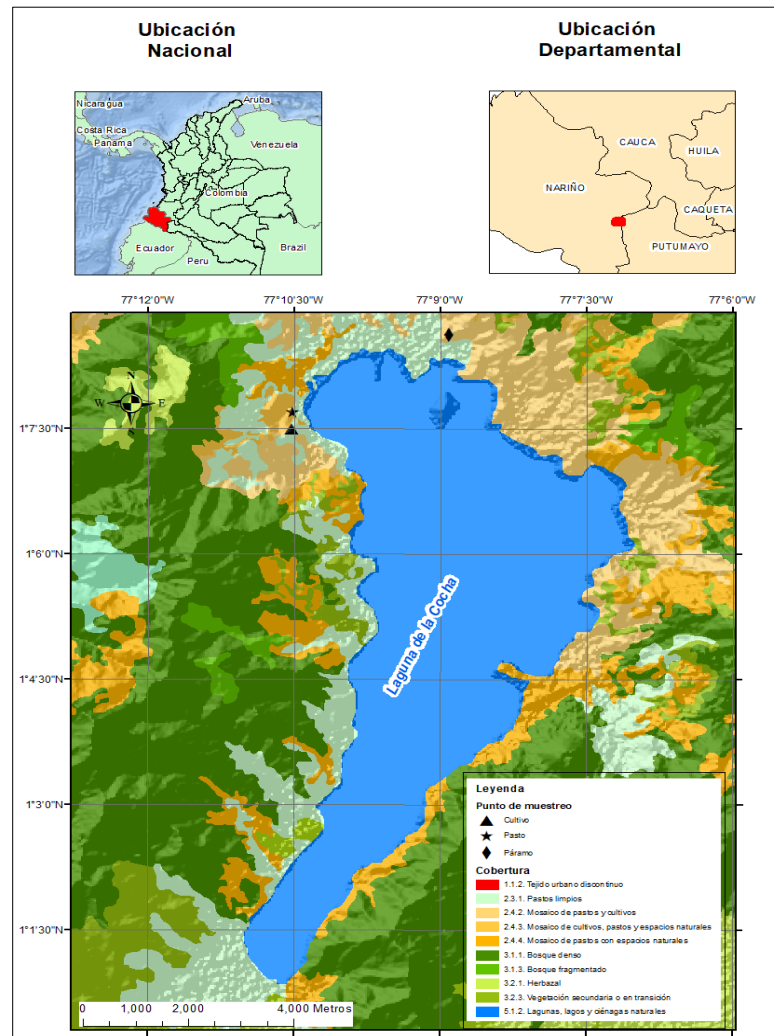
El almacenamiento de COS en páramo es hasta cinco (5) veces mayor en suelos de la sabana tropical y cuatro veces más alto que en suelos cultivados, incluso mayor que en otros ecosistemas de alta montaña como los bosques andinos [4]; no obstante, al igual que en los humedales, dicho almacenamiento es mayor bajo condiciones y cobertura vegetal natural respecto a aquellos intervenidos por el hombre [52]. El almacenamiento de CO se da gracias a las bajas temperaturas, condiciones edáficas particulares (baja densidad aparente, alta porosidad, alta cantidad de materia orgánica) y alta humedad, esto favorece la descomposición lenta de la MO, alcanzando concentraciones de 30% en horizontes superficiales; esto convierte los suelos de páramo en un componente clave ante escenarios de mitigación del cambio climático [53]

## 1.4 Área de estudio

La Laguna de la Cocha, también conocida como Lago Guamués (región de la Cuenca Alta del Río Guamués), forma parte del complejo de humedales del Macizo Colombiano categorizado como humedal de importancia Internacional Ramsar desde 2001 mediante el Decreto 689 del Ministerio de Ambiente [54]. Es considerado uno de los humedales andinos más importantes de Colombia por su valor ecológico en bienes y servicios ambientales con un área de 40,076 ha [54]. Está ubicado en el sur occidente colombiano entre los departamentos de Nariño y Putumayo, forma parte del corredor Andino Amazónico Norte, Ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha, localizado a una altitud entre 2760 y 3400 msnm en las coordenadas 0°50' N y 1° 15' N y 77°5' W y 77°20' W [55]. En el departamento de Nariño, comprende parte del municipio de Buesaco, corregimientos de San Ignacio, Santa Fe, Rosal del Monte, y en el municipio de Pasto, el corregimiento de El Encano, que abarca dieciocho (18) veredas circundantes al Lago Guamués: Campoalegre, Casa pamba, El Carrizo, El Encano, El Estero, El Motilón, El Puerto, El Socorro, Mojondinoy, Naranjal, Ramos, Romerillo, San José, Santa Clara, Santa Isabel, Santa Lucía, Santa Rosa y Santa Teresita [56].

## 1.5 Localización

La zona de estudio abarca la vereda El Motilón y páramo el Bordoncillo, ubicados en el área de influencia del humedal Laguna de la Cocha (Figura 3) entre 1°07' N - 77°10' W y 1°08' N - 77°05' W. Limita al norte con el Municipio de Buesaco, San Francisco, Santiago y con el departamento de Putumayo, al sur con el municipio de Funes, cerro Alcalde y cerro Siquitan, y al oeste con el Municipio de Pasto.



**Figura 3.** Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia

La confluencia de la zona altoandina y amazónica permite la interconexión de ecosistemas de páramo, alta montaña, colinas, planicies, humedales y lago, haciendo posible una alta riqueza hídrica y biológica. Sin embargo, se evidencian procesos de pérdida de cobertura vegetal a causa de la deforestación, conflictos de uso de suelo, reducción y contaminación de caudales, entre otros [55].

## 1.6 Clima

La Ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha, posee precipitaciones superiores a 1000 mm anuales, con lluvias intensas entre los meses de abril a agosto, y una época seca entre octubre y marzo. Según lo reportado por el IDEAM [57], la temperatura media anual oscila entre 8 y 12°C, con una temperatura media de 11,6°C que aumenta desde la ladera del Lago Guamués hacia el interior, alcanzando una temperatura máxima de 12,9°C en los meses de febrero y marzo, con mínimas de 9,6°C en el mes de agosto. La humedad relativa presenta promedios mensuales multianuales (87%) con valores máximos entre junio y julio, y mínimas en los meses de octubre a marzo.

Según Corponariño [55] en el humedal hay tres zonas de vida, páramo pluvial (p-SA) ubicado a una altura superior a 3200 mm, con precipitaciones entre 1000 y 2000 mm, y temperatura menor a 6°C, Bosque muy húmedo (Bmh-M), entre 1000 y 2000 mm, altura entre 2800 – 3000 msnm con temperaturas entre 6°C a 12°C, y Bosque pluvial (Bp-M), precipitaciones superiores a 2000 mm, altura entre 2800 y 3000 msnm, temperatura de 6°C a 12°C.

## 1.7 Suelos

Los suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha pertenecen al orden andisol según la clasificación de la USDA [9], son suelos de origen volcánico, color negro, mal drenados, con alto contenido de carbono orgánico y aluminio intercambiable, alta capacidad de intercambio catiónico y baja fertilidad, con tendencia a la erosión y movimientos en masa debido a su topografía quebrada; la mayor parte de los suelos del humedal son de vocación forestal [55].

De acuerdo con sus características se identifican tres (3) tipos de humedales asociados a i) páramo zonal, ii) humedal lacustre y iii) páramo azonal.

i) Los humedales en zonas de páramo zonal corresponden a turberas o zonas de suelos orgánicos ricos en carbono, del orden andisol ubicados por encima de los 3000 msnm, con texturas variadas y afloramientos rocosos; hacen parte de la unidad geomorfológica Andino-Amazónica con topografía montañosa caracterizada por desniveles y pendientes muy fuertes [55].

ii) El humedal lacustre corresponde a humedales permanentes y emergentes, incluyendo al Lago Guamués, sobre ladera y planicies de inundación según su localización, ubicados entre 2760 y 3400 msnm de origen volcánico, profundos y de color negro [55].

iii) Los humedales de páramo azonal poseen suelos encharcables, correspondientes al orden andisol, pobremente drenados, con pendientes de 0% a 3%, de muy poca profundidad, con texturas gruesas y fuertemente ácidos; están ubicados a una altura promedio de 2760 y 2900 msnm, influenciados por masas de aire provenientes de la amazonia [58].

## 1.8 Cobertura y uso de suelo

Según la clasificación del IGAC [59], los suelos predominantes del Corredor Andino Amazónico Bordoncillo Patascoy pertenecen en su mayoría a las clases VII (41,33%) y VIII (32,69%). En la Tabla 2 se ilustra la clase agrológica, características del suelo y uso potencial en la ecorregión.

**Tabla 2.** Uso de suelo ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha.

Clase Agrológica	Superficie (Ha)	Características	Uso de suelo
III	6.273	Suelos con pendientes de 0 a 12%, con depósitos de ceniza volcánica, textura franco-arenosa y franco arcillosa.	Cultivos transitorios: papa, maíz, frijol, mora, cebolla; cultivos misceláneos; y pastos.
IV	1.662	Pendientes de 12 – 25%, originados por cenizas volcánicas, profundidad moderada a profundos, textura franco-arenosa, bien drenados, fertilidad baja, de fuerte a moderadamente ácidos.	Ganadería semi intensiva, producción de leche, pastos kikuyo, saboya y en menor proporción pastos mejorados.
V	8.613	Con suelos de relieves planos menores al 7%, formados por depósitos orgánicos.	Constantemente drenados.
VI	8.242	Suelos originados por ceniza volcánica, con pendientes entre 25 y 50%, textura franco-arenosa a arenosa franca, con fuerte acidez.	Ganadería semintensiva.
VII	46.039	Suelos con pendientes fuertes que van del 25 a 50%, originados por capas de cenizas volcánicas, presentan una profundidad efectiva de superficial a profunda, de textura franco-arenosa, suelos de alta porosidad, buena permeabilidad y baja fertilidad.	Bosques primarios intervenidos y bosque secundario.
VIII	36.428	Suelos con pendientes fuertes por encima del 50%, originado por material ígneo y capas delgadas de cenizas volcánicas, superficiales de textura franco-arenosa con escurrimiento difusos y moderadamente susceptibles a la erosión.	Páramos zonales y bosques naturales primarios.

Fuente: Adaptado de CORPONARIÑO, 2011

La clase de cobertura del suelo se observan en la Tabla 3; están clasificadas en vegetación de páramo (9,8%), vegetación de primer crecimiento (39,2%), vegetación arbustiva y arbórea (24,7%), pastizales (12,7%), agroecosistemas (9,2%); zonas inundadas (4,0%), áreas deterioradas (0,2%) y área urbanizada correspondiente a cascos urbanos (0,2).

**Tabla 3.** Cobertura vegetal en la ecorregión Bordoncillo Patascoy – La Cocha

<b>Clase</b>	<b>Tipo</b>	<b>%</b>
Vegetación de páramo	Páramo zonal	6,9
	Páramo azonal	2,9
Vegetación de primer crecimiento	Bosque primario	8,2
	Bosque primario intervenido	28,4
	Rastrojo	2,6
Vegetación arbustiva y arbórea	Bosque secundario	24,6
Pastizales	Plantación forestal	0,1
	Pastos naturales con árboles, arbustos y/o cultivos	12,7
Agroecosistemas	Agroecosistemas	9,2
Zonas inundadas	Espejos de agua	3,7
	Pantanos y turberas	0,3
Áreas deterioradas	Áreas sin vegetación	0,2
	Casco urbano	0,2

Fuente: Adaptado de CORPONARIÑO, 2011

## **2. Capítulo 2. Cuantificación de carbono en suelos del humedal Laguna de la cocha**

### **2.1 Introducción**

El suelo se constituye como el mayor reservorio de carbono en el mundo, se estima que el carbono orgánico almacenado en el primer metro de suelo es de 1.500 Pg, siendo superior a la combinación de reservas como la atmósfera (800 Pg C) y la vegetación (500 Pg C) [27]. La captura de carbono implica la transferencia del CO<sub>2</sub> a través de la humificación de biosólidos añadidos al suelo y por formación de carbonatos secundarios o lixiviación de bicarbonatos en el agua subterránea [60].

La importancia e interés por el COS ha incrementado gradualmente con el paso del tiempo toda vez que se relaciona con cambios en la fertilidad y erosión del suelo y su efecto directo sobre el cambio climático global [28][61][62]. El almacenamiento de COS está influenciado por las condiciones climáticas, formación del suelo, material parental y profundidad del suelo [63], y ha sido cuantificado por autores como Rodríguez et al., [64], Canedoli et al., [1], Leifeld et al., [65], Twongyirw et al., [66] y Loaiza-Usuga et al., [67], quienes hacen énfasis en el análisis del uso de suelo para la estimación del carbono orgánico en los diferentes ecosistemas. Lal et al., [68], aseguran que el uso y manejo del suelo influyen drásticamente en el almacenamiento de COS, hasta tal punto de ser catalogado como fuente o reservorio de Carbono [69].

Gran parte de las investigaciones sobre el almacenamiento de carbono en el suelo están enfocadas en suelos de bosques y cultivos [38]. Sin embargo, áreas de alta montaña vulnerables al cambio climático, como los suelos de páramo y humedales andinos, son claves para entender la dinámica del almacenamiento de COS [70], estas zonas son conocidas principalmente por la provisión de servicios hidrológicos y por su rol en la captura de carbono [71].

En este sentido, cuantificar y conocer el comportamiento del almacenamiento de COS fomenta la protección de los ecosistemas andinos, ya que el suelo se comporta como “un reservorio de carbono estabilizado” [72]. A continuación, se realiza un análisis cuantitativo del almacenamiento de COS en función del uso de suelo en el humedal Laguna de la Cocha.

## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.1 Localización del área de estudio

Esta investigación fue desarrollada en la Laguna de la Cocha, humedal Ramsar que hace parte del Corredor Andino Amazónico Norte, específicamente en el corregimiento El Encano, municipio de Pasto departamento de Nariño, entre 1°07'41" N 77°10'30" W 1°08'37" N 77°05'52" W, vereda El Motilón y páramo el Bordoncillo respectivamente. La precipitación media anual es de 1632 mm y la temperatura varía entre 8 y 12°C. Sus suelos están clasificados taxonómicamente como Andisoles formados a partir de depósitos lacustres, con pH ácido, drenaje lento, fertilidad baja y pendientes fuertes [73].

### 2.2.2 Selección del área de estudio y diseño experimental

Para la selección del área de estudio se tomó como referencia la investigación de Portilla [74] en la que se evidencian los cambios que han experimentado los suelos del humedal Laguna de la Cocha desde 1989 hasta 2016. El criterio de selección para pasto kikuyo y cultivo de papa fue la antigüedad de uso (10 y 30 años respectivamente), y zonas bajo cobertura vegetal natural para suelo de páramo en las que no se evidencien alteraciones por actividad antrópica. Se planteó un diseño experimental completamente al azar (ecuación 1) bajo un muestreo aleatorio simple con tres repeticiones por uso de suelo. El área de páramo estudiada correspondió a 3658 m<sup>2</sup>, cultivo de papa 273 m<sup>2</sup> y pasto kikuyo 157 m<sup>2</sup>.

**Ecuación 1.** 
$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = variable respuesta de la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento

$\mu$ = media general

$\tau_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$ = error experimental, donde  $\varepsilon_{ij} \sim N(0; \sigma^2)$ .

### 2.2.3 Toma y procesamiento de muestras de suelo

En cada área de uso de suelo se establecieron tres puntos de muestreo a través de calicatas de 1m<sup>3</sup> de volumen (Figura 4). La selección de cada calicata se realizó teniendo en cuenta las zonas más representativas observadas en campo. En cada calicata se extrajeron muestras a intervalos de profundidad de 0-5cm, 5-15cm, 15-30cm, 30-50cm, 50-70 cm y 70-100cm, siguiendo la metodología propuesta por Montané et al. [75]. En total se recolectaron 18 muestras disturbadas por uso de suelo almacenadas en bolsas

plásticas (2kg) para análisis de concentración de carbono, y 36 muestras no disturbadas por uso de suelo en cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de alto para análisis de densidad aparente (Tabla 4).

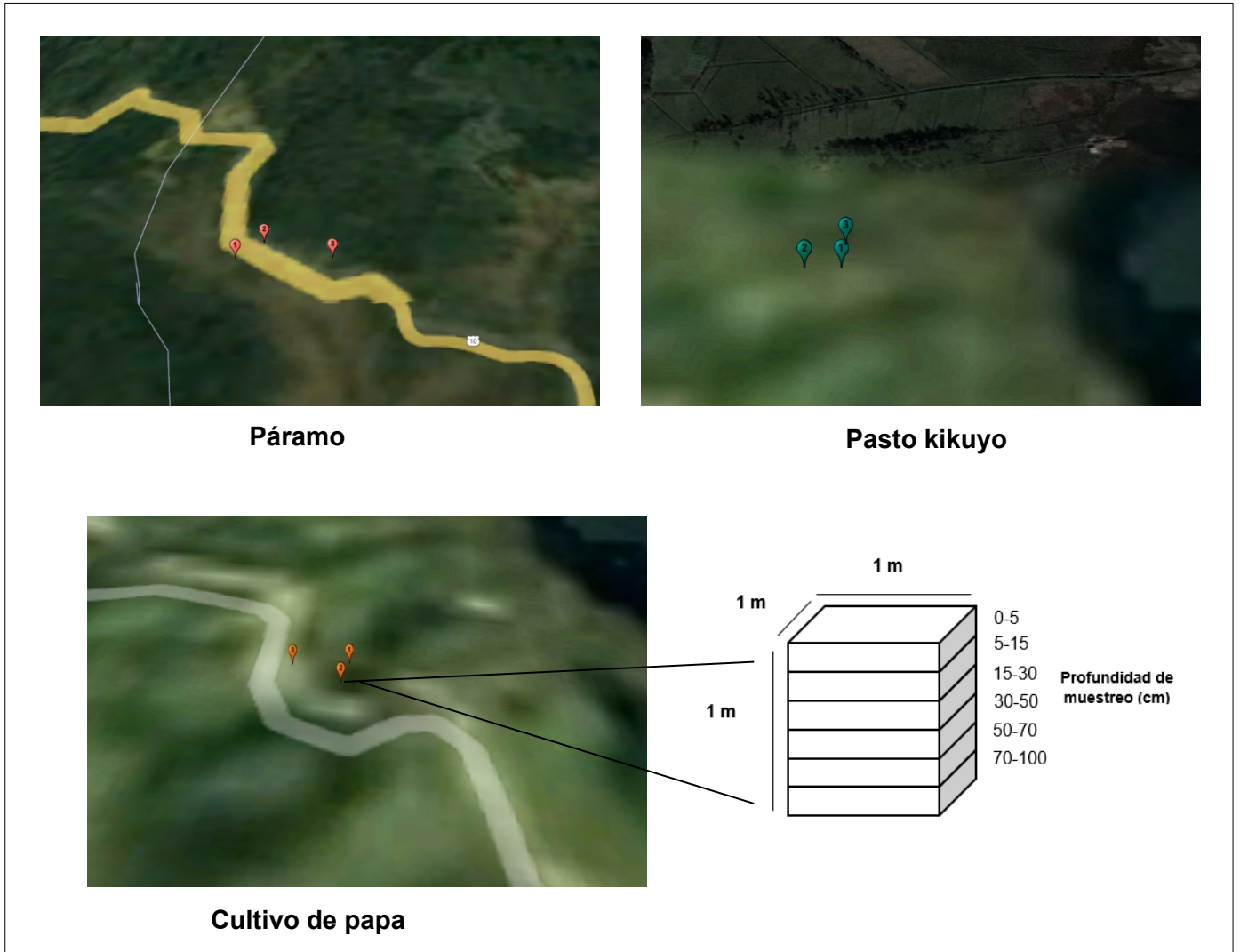


Figura 4. Puntos de muestreo de suelo.

Tabla 4. Número de muestras de suelo para análisis de concentración de carbono y densidad aparente.

Uso de suelo	Profundidad de muestreo (cm)	Muestras para análisis de concentración de carbono	Muestras para análisis de densidad aparente
Pasto kikuyo	0-5	3	6
	5-15	3	6
	15-30	3	6

	30-50	3	6
	50-70	3	6
	70-100	3	6
	<b>Subtotal</b>	<b>18</b>	<b>36</b>
Cultivo de papa	0-5	3	6
	5-15	3	6
	15-30	3	6
	30-50	3	6
	50-70	3	6
	70-100	3	6
	<b>Subtotal</b>	<b>18</b>	<b>36</b>
Páramo	0-5	3	6
	5-15	3	6
	15-30	3	6
	30-50	3	6
	50-70	3	6
	70-100	3	6
	<b>Subtotal</b>	<b>18</b>	<b>36</b>
<b>Total</b>		<b>54</b>	<b>108</b>

## 2.2.4 Almacenamiento de carbono orgánico del suelo

El almacenamiento de COS fue estimado mediante la ecuación 2, propuesta por Da Silva *et al.* [76].

**Ecuación 2.** 
$$\text{Almacenamiento de COS} = C \times Da \times T \times 10^{-3} \times 10^4$$

Donde:

Almacenamiento de COS = contenido de C en suelo por unidad de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

C= Carbono acumulado ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Da= Densidad aparente del suelo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

T= Profundidad de la muestra (m).

$10^{-3}$  = Factor para expresar en Mg de C.

$10^4$  = Factor para expresar en  $\text{Mg ha}^{-1}$

En el laboratorio del Centro de Investigación La Selva de Agrosavia, ubicado en Llano Grande, Antioquia, se determinó el carbono orgánico a través de la metodología de Walkley & Black [77], digestión húmeda con Dicromato de Potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) y Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado, asumiendo un factor de conversión 0,74; y la densidad aparente de los cilindros de suelo, mediante la Ecuación , siguiendo la metodología propuesta por Blake

& Hartge [78], secando muestras al horno a 105°C hasta alcanzar un peso constante por 24 a 48 horas.

Ecuación 3.

$$Da \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa de suelo seco (g)}}{\text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}}$$

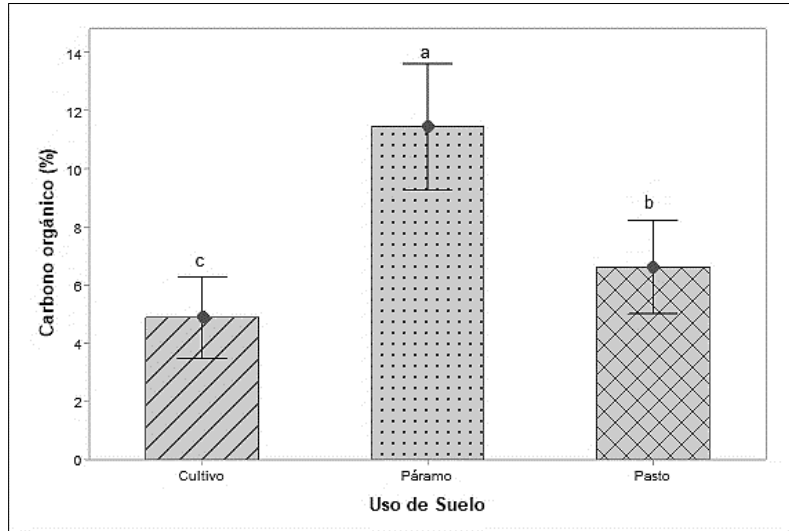
### 2.2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con base en la metodología propuesta por Webster & Oliver [79]. Los datos de las variables estudiadas se evaluaron a través de análisis descriptivo: desviación estándar, medias, coeficiente de variación, máximo y mínimo. Para establecer la significancia estadística en función del tipo de uso de suelo, profundidad de muestreo y eficiencia para acumular carbono orgánico, se realizó un análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas. Para evaluar si existen diferencias significativas en el almacenamiento de COS, porcentaje de CO y densidad aparente ( $D_a$ ) por uso de suelo y profundidad de muestreo, se realizó una comparación de medias a través de pruebas de Tukey con nivel de significancia de  $p < 0,05$ . Se realizó un análisis de regresión entre la  $D_a$  y el % CO para determinar la existencia de asociación entre estas dos variables utilizando el coeficiente de Pearson. El análisis de datos se realizó a través del programa estadístico Minitab 19.

## 2.3 Resultados y discusión

### 2.3.1 Concentración de carbono orgánico del suelo

Los resultados del contenido de carbono orgánico por uso de suelo se muestran en la Figura 5. Se encontró diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) para los diferentes usos de suelo, siendo el suelo bajo condición de páramo (11,4%) el que presenta mayor concentración de COS, seguido de pasto kikuyo (6,6%) y cultivo de papa (4,9%). El contenido de COS disminuyó en más del 50% en suelos bajo pasto kikuyo y cultivo de papa con relación a suelos de páramo. Este comportamiento es acorde a lo expuesto por Fassbender & Bornemisza [15] quienes reportan menor concentración de carbono orgánico en andisoles cultivados con papa y pasto kikuyo, que en aquellos que se encuentran bajo vegetación natural, debido, principalmente, a la mineralización de la materia orgánica por la preparación de suelo y uso de fertilizantes.



**Figura 5.** Porcentaje promedio de carbono orgánico por uso de suelo

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican desviación estándar.

La concentración de carbono en el suelo de páramo puede atribuirse a la presencia de cobertura vegetal natural basada en musgos y frailejones, y al clima frío ( $< 6^{\circ}\text{C}$ ) y húmedo a gran altura ( $> 3.200$  msnm) que influyen en menor descomposición de la MOS. Estos resultados coinciden con Gutiérrez et al., [80] y Ayala et al., [81] quienes reportaron entre 11% y 17% de COS en páramos Colombianos y Ecuatorianos respectivamente. Difiere con lo reportado por Lis et al., [51] en el Páramo de Guerrero, Cundinamarca, en el cual el COS alcanza concentraciones entre 11% y 26%.

El porcentaje medio de carbono en el suelo bajo condición de pasto kikuyo y cultivo de papa es de 6,6% y 4,9% respectivamente, valores superiores a lo reportado por Arteaga et al., [82] en andisoles de Nariño bajo las mismas condiciones de uso de suelo (4,4% y 3,1%) y a lo encontrado por Lis et al., [51]. Según Pérez et al., [83] y Ortiz & Medina [84], las plantas perennes como el pasto kikuyo, tienen mayor concentración de carbono que otras plantas no perennes debido a la mayor producción de forraje asociado al volumen de su sistema radicular.

De los usos de suelo estudiados, el suelo cultivado presentó menor concentración de carbono orgánico, como resultado de la producción intensiva de papa. Esmaeilzadeh et al., [85] encontraron que la concentración de COS en suelos cultivados con papa disminuye con el incremento de la edad del cultivo y la aplicación de enmiendas y fertilizantes no orgánicos. Sin embargo, autores como López et al., [86] encontraron mayor concentración de COS en suelos bajo cultivo de papa respecto a cultivos de maíz, avena y haba.

Los suelos evaluados en el humedal Laguna de la Cocha, presentaron una concentración de CO alta (2,5% - 6%) para suelos bajo cultivo de papa y pasto kikuyo, y muy alta ( $> 6\%$ ) para páramo, según la clasificación establecida por el IDEAM [87] para andisoles del macizo colombiano. Se encontró diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) (Tabla 5)

en los contenidos de COS a profundidad para los diferentes usos de suelo. El mayor porcentaje de carbono (16,9%) se registró a una profundidad de 0-5 cm en suelos de páramo, mientras que el mínimo (1,6%) se evidenció en cultivo de papa a 70 y 100 cm de profundidad.

**Tabla 5.** Concentración promedio de carbono orgánico por uso de suelo y profundidad de muestreo.

<b>Profundidad (cm)</b>	0-5	5-15	15-30	30-50	50-70	70-100
<b>Uso de suelo</b>	<b>COS (%)</b>					
Cultivo de papa	8,7 a	7,4 ab	5,9 b	3,4 c	2,3 c	1,6 c
Pasto kikuyo	11,5 a	8,4 ab	7,4 bc	5,8 bcd	4,0 cd	2,7 d
Páramo	16,9 a	15,7 ab	12,8 bc	9,6 cd	8,1 de	5,5 e

COS: carbono orgánico del suelo. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por profundidad de muestreo en cada uso de suelo.

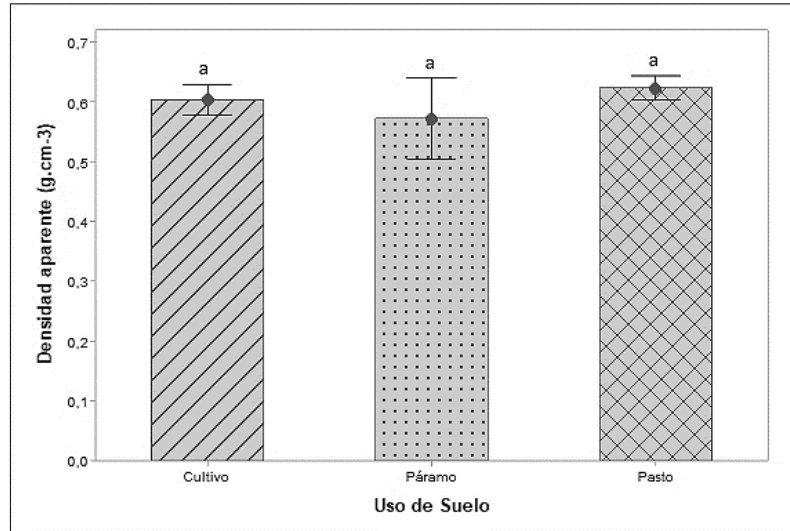
Para todos los usos de suelo estudiados en el humedal Laguna de la Cocha, se evidenció una disminución progresiva entre el porcentaje de carbono orgánico y la profundidad del perfil de suelo, lo que podría indicar mayor actividad biológica en las capas superiores del suelo [88]. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Thompson et al., [3] y Reyna et al., [89] en andisoles Ecuatorianos. La concentración de COS promedio a 30 cm de profundidad es de 75,2% en cultivo de papa, 68,6% en pasto kikuyo y 66,1% en páramo; estos resultados confirman el supuesto del IPCC [63] en el cual se asegura que el mayor contenido de CO se concentra en los horizontes superficiales del suelo debido a la acumulación de restos orgánicos y actividad microbiana.

### 2.3.2 Densidad aparente del suelo

La densidad aparente ( $D_a$ ) presentó una media de  $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$  en páramo,  $0,60 \text{ g.cm}^{-3}$  en cultivo de papa y  $0,62 \text{ g.cm}^{-3}$  en pasto kikuyo (Figura 6). Estos resultados se asocian a la génesis de los andisoles, en los cuales la baja densidad aparente ( $< 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ ) está influenciada por el incremento del contenido de alófana y materia orgánica [90]. Lo encontrado en esta investigación coincide con lo reportado por Buytaert et al., [53], McDaniel & Wilson [91], y Astier et al., [92] en andisoles de Ecuador, Estados Unidos y México respectivamente. Según Nanzyo et al., [93] el desarrollo de la estructura porosa del suelo, es la principal responsable de la baja densidad aparente en andisoles, asociado a condiciones de clima frío y altos niveles de precipitación.

Para la variable  $D_a$ , no se encontró diferencias significativas por uso de suelo ( $p = 0,071$ ) ni por profundidad evaluada ( $p = 0,693$ ). El comportamiento de la variable no muestra una tendencia diferenciada entre los usos y las profundidades (Tabla 6). A pesar de que no existen diferencias estadísticas significativas, la densidad aparente de suelos bajo pasto kikuyo y cultivo de papa es levemente mayor que en páramo, lo que podría estar relacionado con las actividades antrópicas llevadas a cabo en estos suelos, en las cuales las condiciones de porosidad y retención de humedad disminuyen [94].

Por lo general los valores más altos de densidad aparente se encuentran en suelos mal drenados que tienden a la compactación, mientras los suelos con baja Da presentan buena penetración de raíces y altos porcentajes de porosidad [15], lo que coincide con los resultados encontrados en esta investigación (Ver capítulo 4).



**Figura 6.** Densidad aparente por uso de suelo

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ). Las barras indican desviación estándar.

**Tabla 6.** Densidad aparente por uso de suelo y profundidad de muestreo

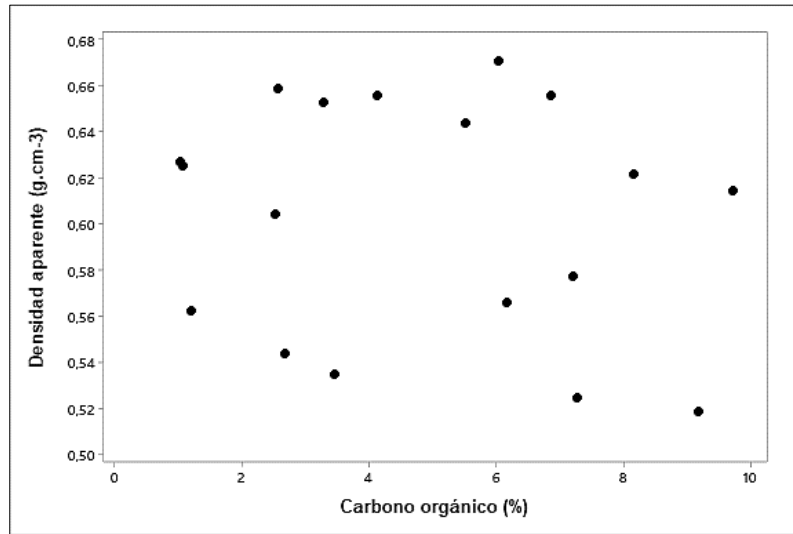
Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30	30-50	50-70	70-100
<b>Uso de suelo</b>	<b>Da (g.cm<sup>-3</sup>)</b>					
Cultivo	0,57 a	0,60 a	0,63 a	0,60 a	0,61 a	0,62 a
Pasto	0,65 a	0,53 a	0,50 a	0,70 a	0,54 a	0,51 a
Páramo	0,64 a	0,63 a	0,59 a	0,62 a	0,63 a	0,63 a

Da: densidad aparente. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por profundidad de muestreo y uso de suelo.

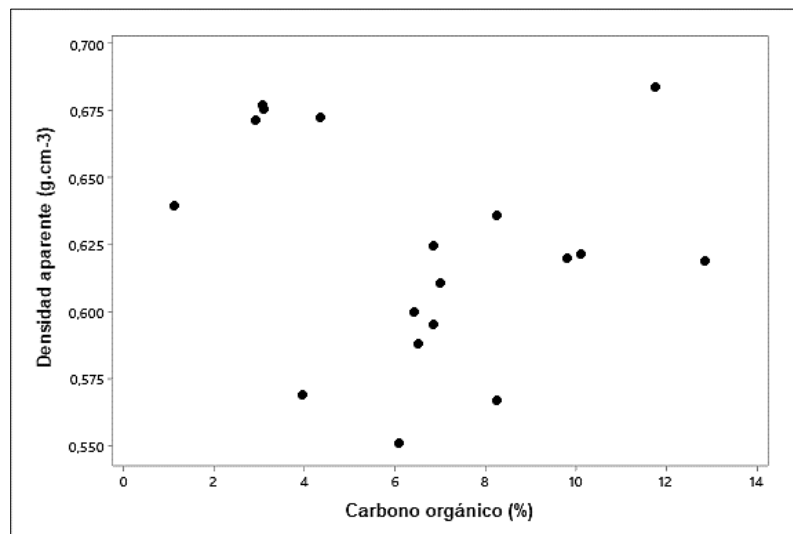
### 2.3.3 Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico del suelo

No se encontró una correlación significativa entre Da y COS en función de los diferentes usos de suelo ( $r=0,022$ ,  $p=0,876$ ). Los resultados indican la existencia de otros factores, además del CO, que afectan la densidad aparente en los suelos del humedal Laguna de la Cocha, como el material parental [95]. En los suelos bajo cultivo de papa ( $r= -0,157$ ,  $p=0,534$ , Figura 7) y pasto kikuyo ( $r= -0,170$ ,  $p=0,500$  Figura 8) se observó una relación inversa entre la densidad aparente y la concentración de COS. Estos resultados son similares a los reportados por Chen & Twilley [96], Arvidsson [97] y Cazorla et al., [98], quienes encontraron una disminución en los valores de densidad aparente en función del aumento del carbono orgánico y la porosidad del suelo.

El comportamiento del COS encontrado bajo cultivo de papa y pasto kikuyo estaría relacionado con la presencia de carbono en formas menos recalcitrantes como ácidos fúlvicos (CAF) y sustancias no húmicas, debido al efecto de la adición de fuentes orgánicas y de fertilizantes asociadas al manejo del suelo, tal y como lo reportan Zamboni et al., [99], quienes aseguran que los ácidos fúlvicos (AF), a diferencia de los ácidos húmicos (AH), serían más susceptibles a sufrir procesos de transformación por presentar grupos carboxilos débiles.

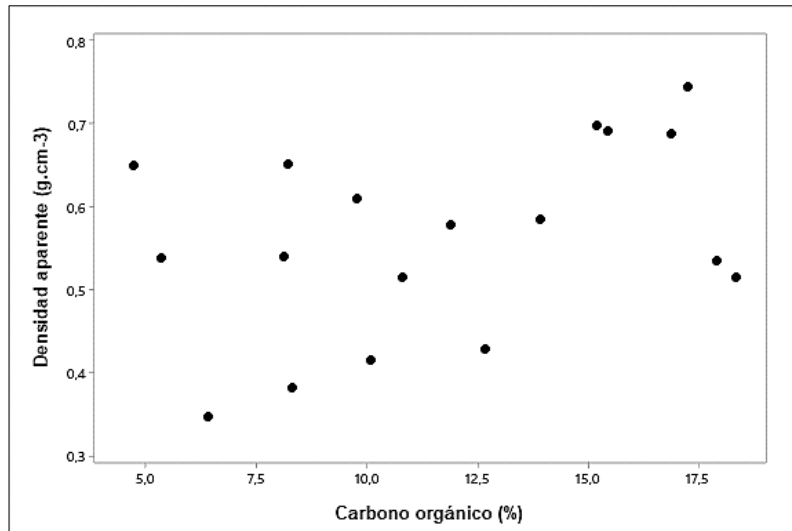


**Figura 7.** Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo uso de suelo cultivo de papa.



**Figura 8.** Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo uso de suelo pasto kikuyo

La relación positiva y no estadísticamente significativa entre la Da y el COS en suelos de páramo ( $r= 0,379$ ,  $p=0,121$ , **Figura 9**), difiere de lo reportado por Montes et al.,[100] y Zúñiga et al.,[90] en páramos colombianos, quienes encontraron una relación inversa entre el COS y la Da. Esto indicaría que bajo la condición de páramo estudiada predomina el carbono asociado a ácidos húmicos (CAH), los cuales no contribuyen a la agregación del suelo debido a su relación estrecha con los microagregados ( $<0,25\text{mm}$ ) [101][102] (resultados soportados en el capítulo 4).

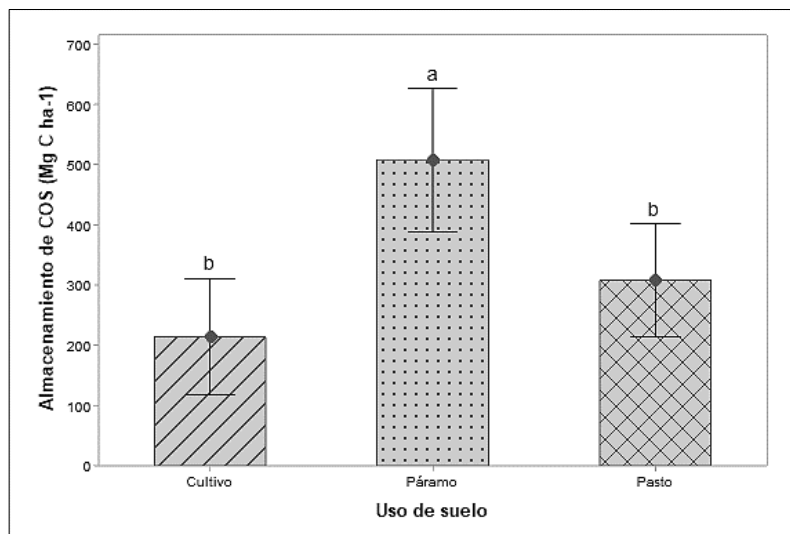


**Figura 9.** Relación entre densidad aparente y concentración de carbono orgánico bajo suelo de páramo

### 2.3.4 Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo

El CO almacenado en el suelo en función del uso presentó diferencias estadísticas significativas ( $p<0,05$ ) (Figura 10), al igual que para las diferentes profundidades de muestreo ( $p<0,05$ ) (Tabla 7). Los resultados muestran que tanto la profundidad como el uso de suelo, influyen en la dinámica del almacenamiento del COS, lo que coincide con lo reportado por Lal et al.,[11], Murty et al.,[103] y Post & Kwon [104].

El almacenamiento de COS en los suelos evaluados en el humedal Laguna de la Cocha, osciló entre  $189 \text{ Mg C ha}^{-1}$  y  $542 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , siendo superior al promedio mundial reportado por Batjes et al.,[17] para Andisoles ( $114 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) y muy superior a lo expuesto por Matthews et al.,[105] en suelos andinos de Colombia ( $>51 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), esto presume que, a pesar de las actividades antrópicas llevadas a cabo en el humedal, existe un alto potencial de almacenamiento de carbono orgánico vinculado a la influencia de factores formadores, tales como material parental, relieve y clima, valores bajos de Da y al historial del uso de suelo [49][106].



**Figura 10.** Almacenamiento de carbono orgánico por uso de suelo

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican desviación estándar.

El suelo de páramo presentó una media de almacenamiento de COS de  $508,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , lo que coincide con lo reportado por Montes et al., [100] ( $550 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) en el páramo de Sumapaz, Cundinamarca y difiere de la investigación desarrollada por Thompson et al., [3] en páramos Ecuatorianos ( $1.418 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ). El almacenamiento de carbono orgánico bajo la condición de páramo es superior al suelo cultivado con papa y pasto kikuyo, como respuesta al aporte continuo de material orgánico, régimen altitudinal ( $>3200 \text{ msnm}$ ) y a la protección que ejerce la cobertura vegetal natural sobre la superficie del suelo, lo que en conjunto disminuye la velocidad de descomposición de la MOS, reduce la degradación física y mejora la conservación del suelo [107][108][109]. Resultados acorde a lo reportado por autores como Dercon et al., [110] y Sheikn et al., [88], quienes encontraron una correlación positiva entre los aportes de residuos orgánicos y hojarasca en condición de bosque natural con el almacenamiento de carbono orgánico.

El almacenamiento de carbono orgánico bajo pasto kikuyo ( $308,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), estaría relacionado con el aporte de carbono que generan las raíces del suelo asociado a pasturas perennes [114], caracterizadas por presentar gran cantidad de raíces finas, profundas y ramificadas en todo el perfil del suelo, y la movilización de carbono desde horizontes superficiales por la alta producción de rebrotes y la presencia de estolones que alcanzan hasta dos (2) metros de profundidad [111][112]. Autores como Lorenz y Lal [113] aseguran que los suelos bajo pastizales, comparados con cultivos y monocultivos, son más eficientes a la hora de almacenar recursos disponibles para el crecimiento de biomasa e intervenir en el stock de COS.

En lo que respecta al suelo cultivado con papa ( $223,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) su comportamiento podría atribuirse al rompimiento de los agregados producto de la labranza, lo que incrementa la tasa de transformación de la MO y la probabilidad de sufrir erosión, disminuyendo significativamente el almacenamiento de CO estable en los horizontes superficiales [114].

Esta condición ha sido explicada por Gweyi et al., [115] quienes afirman que la labranza promueve el contacto entre el cultivo – residuo - suelo, lo que origina pérdida de la MOS por degradación microbiana. Por su parte Poeplau & Don [116] mencionan que los suelos cultivados pierden parte de su estructura original y capacidad de retención de agua, al igual que un 30% a 40% de COS en comparación con suelos bajo vegetación natural, por lo que Dey et al., [117] sugieren que disminuir la labranza intensiva e incrementar la rotación de cultivos trae consigo acumulación de COS. Los resultados encontrados en esta investigación son superiores a lo reportado por Twongyirwe et al., [66] en andisoles de Uganda cultivados con papa (84,5 y 95,6 Mg C ha<sup>-1</sup>) y por García et al., [118] en suelos andinos venezolanos (136,6 Mg C ha<sup>-1</sup>).

En las tres condiciones de uso de suelo estudiadas, más del 50% del almacenamiento de carbono se concentró en los 30 primeros cm de profundidad (Tabla 7), como respuesta a la mayor acumulación de materia orgánica. La fuerte caída del contenido de COS a profundidades superiores de 30 cm ha sido documentada por varios autores [51][88][119], quienes asocian el almacenamiento de COS en horizontes superficiales del suelo, a la actividad biológica y acumulación de complejos arcillo húmicos que forma la MOS. Otros autores como Were et al., [120] y Solís et al., [121] reportan una mayor acumulación de CO en las capas superiores para suelos cultivados y bajo pasturas debido al crecimiento y fortalecimiento de raíces.

**Tabla 7.** Almacenamiento de COS por uso de suelo y profundidad de muestreo.

Profundidad (cm)	0-30	30-50	50-70	70-100
<b>Uso de suelo</b>	<b>Almacenamiento de COS (Mg C ha<sup>-1</sup>)</b>			
Cultivo de papa	125,03 a	40,51 b	28,34 b	20,01 b
Pasto kikuyo	154,7 a	70,58 b	49,13 b	26,71 b
Páramo	263,21 a	97,9 b	92,78 b	54,34 b

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por profundidad de muestreo

## 2.4 Conclusiones

El almacenamiento del COS en suelos del humedal Laguna de la Cocha, está directamente relacionado con la acción antrópica y por ende con el uso de suelo.

La concentración de carbono en el suelo cultivado con papa disminuyó cinco (5) veces frente a los valores reportados para suelos de páramo y dos (2) veces frente a pasto kikuyo.

La densidad aparente del suelo no presentó una relación directa con el uso de suelo, infiriendo que esta variable está más asociada a la génesis de los andisoles y la acción de los factores formadores, en especial con el material parental.

## **3. Capítulo 3. Carbono orgánico, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.**

### **3.1 Introducción**

La formación del suelo está directamente influenciada por la interacción de los factores clima, organismos, relieve, tiempo y material parental [122]. La interacción de estos factores determina la eficiencia de los procesos físicos, químicos y biológicos, que actúan sobre el material parental, condicionando el funcionamiento y composición del suelo [123].

El material parental del suelo sufre transformaciones físicas asociadas a la reducción del tamaño de partículas, debido a los efectos ambientales y del clima, favoreciendo la variabilidad de las propiedades físicas del suelo [124]. Químicamente, las partículas se pueden desprender o separar por la acción de líquidos, gases y compuestos orgánicos, permitiendo su degradación y/o síntesis en nuevos compuestos sólidos estables [124]. Biológicamente, la microbiota presente en el suelo, cataliza las reacciones biológicas asociadas a la degradación del material orgánico y producción de dióxido de carbono mediante la respiración, modificando la concentración de carbono en el suelo [124]. La presencia de flora, macro y microfauna, favorecen el desarrollo del ciclo biogeoquímico y el cambio de las propiedades antes expuestas, debido a efectos mecánicos por la presión de raíces, tallos y/o animales [125].

El producto final de estas interacciones son suelos con propiedades físicas, químicas y biológicas definidas, en las cuales, según Tejada et al.,[126] y Ferreras et al.,[127], la materia orgánica del suelo es considerada como el elemento enlace (directo e indirecto) debido a su relación con la calidad del suelo, pues almacena nutrientes para las plantas, es fuente de carbono y energía, mejora la dinámica del agua y el aire en el suelo, controla la erosión, y en conjunto, prestan servicios ecosistémicos diferenciales [89].

El desarrollo de actividades antrópicas, como agricultura, ganadería y asentamientos, influyen en el contenido de materia orgánica del suelo [128]. Dicho efecto ha sido caracterizado como importante tema de estudio en las ciencias del suelo, pues modifica directamente el contenido de MOS [23]. Goyal, et al.,[129] enfatizan en la importancia del COS, toda vez que es el principal componente cuantitativo de la MOS. Al respecto, Tatsuya et al.,[130] y Tiphaine et al.,[131], aseguran que el COS describe de mejor manera, el

estado de los servicios ecosistémicos (SE) suministrados por el suelo, a través de su almacenamiento y la interacción con las propiedades del suelo.

En este capítulo se describe la caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas, de tres andisoles del humedal Laguna de la Cocha, bajo uso de suelo pasto kikuyo, cultivo de papa y páramo, evaluando las relaciones existentes entre estas propiedades y la tasa de almacenamiento del COS.

## 3.2 Materiales y métodos

### 3.2.1 Localización del área de estudio

El humedal Laguna de la Cocha es considerado uno de los humedales altoandinos más extensos en Colombia [73], es el segundo cuerpo natural de agua en zonas de alta montaña más grande del país después del Lago de Tota. Geográficamente está localizado en un área formada por la “estrella fluvial del páramo el Bordoncillo y cerro Patascoy” [55]. Sus suelos han sido sometidos al desarrollo de actividades agrícolas y agropecuarias, especialmente monocultivo de papa y cebolla y tala de bosques [132].

### 3.2.2 Toma y procesamiento de muestras de suelo

Para el análisis y caracterización de las propiedades físicas y químicas se tomaron muestras de suelo disturbadas almacenadas en bolsas plásticas (2 kg), a intervalos de profundidad 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 [75] en cada una de las calicatas y áreas de muestreo descritas en el diseño experimental del Capítulo 2. En total se recolectaron 18 muestras por uso de suelo (**Tabla 8**).

**Tabla 8.** Número de muestras de suelo para análisis de propiedades físicas y químicas.

Uso de suelo	Profundidad de muestreo (cm)	Muestras para análisis de propiedades físicas	Muestras para análisis de propiedades químicas
Pasto kikuyo	0-5	3	3
	5-15	3	3
	15-30	3	3
	<b>Subtotal</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
Cultivo de papa	0-5	3	3
	5-15	3	3
	15-30	3	3
	<b>Subtotal</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
Páramo	0-5	3	3
	5-15	3	3
	15-30	3	3
	<b>Subtotal</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
<b>Total</b>		<b>27</b>	<b>27</b>

Para el análisis de propiedades biológicas se tomaron muestras de suelo usando un palín hasta 5 cm de profundidad. Se seleccionó al azar 12 áreas contiguas a cada una de las calicatas, las cuales se consideraron submuestras, posteriormente se homogenizaron en recipientes plásticos debidamente rotulados por uso de suelo para formar una muestra de suelo compuesta (Tabla 9). Las muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas (2 kg) y estas a su vez en neveras portátiles a una temperatura aproximada de 4°C hasta su traslado al laboratorio del Centro de Investigación La Selva de Agrosavia, ubicado en Llano Grande, Antioquia.

**Tabla 9.** Número de muestras de suelo para análisis de propiedades biológicas.

Uso de suelo	Profundidad de muestreo (cm)	Submuestras	Muestras compuestas
Pasto kikuyo	0-5	36	2
Cultivo de papa	0-5	36	2
Páramo	0-5	36	2
<b>Total</b>		<b>108</b>	<b>6</b>

Para caracterizar las propiedades químicas del suelo se seleccionó variables como pH, conductividad eléctrica, fósforo disponible, nitrógeno total y materia orgánica. Para las propiedades biológicas: biomasa microbiana, carbono de la biomasa microbiana, nitrógeno de la biomasa microbiana y respiración basal. Para las propiedades físicas: textura (tamaño de partículas), densidad real, porosidad total, macro, meso y microporos. La metodología utilizada para el análisis de cada variable se observa en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Métodos utilizados para análisis de propiedades químicas, biológicas y físicas, del suelo.

Variable	Método
pH agua (1:1)	Potenciómetro [133]
pH KCl (1:2)	Potenciómetro [133]
Conductividad eléctrica	Extracto de saturación [134]
Fosforo disponible	Bray II [135]
Nitrógeno total	Kjeldahl [135]
Materia orgánica	Oxidación vía húmeda [136]
Biomasa microbiana	Fumigación con Cloroformo libre de etano durante 24h [137].
Carbono de la biomasa microbiana	Determinación por combustión en un TOC Shimadzu de muestras provenientes de los extractos de suelos (fumigados con cloroformo y no fumigados). Se consideró el factor de conversión 2,46 para el cálculo [138].
Nitrógeno de la biomasa microbiana	Digestión de muestras provenientes de los extractos de suelos (fumigados con cloroformo y no fumigados con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Conc., sulfato de sodio (CuSO <sub>4</sub> ). Destilación y titulación con ácido clorhídrico (HCl). Se consideró 1,46 como factor de conversión [137].

Respiración Basal	Uso de trampas de álcali NaOH, incubadas a 25°C durante 24h. Para estimar el CO <sub>2</sub> liberado como respuesta fisiológica de los microorganismos en condiciones mínimas de fuentes de sustrato lábil [139].
Índice metabólico	Relación entre carbono asociado a la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo [138]
Coeficiente metabólico,	Relación entre la respiración basal y carbono asociado a la biomasa microbiana [138]
Textura	Bouyoucos [140]
Densidad real	Picnómetro [141]
Porosidad total	Método de platos de cerámica [142]. Relación entre densidad real y aparente.
Macroporos	Método de platos de cerámica [142]. %punto de saturación - % capacidad de campo [143]
Mesoporos	Método de platos de cerámica [142]. % capacidad de campo – % punto de marchitez permanente [143]
Microporos	Porosidad total – macroporos - mesoporos

### 3.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con base en la metodología propuesta por Webster & Oliver [79]. Los datos de las variables estudiadas se evaluaron a través de análisis descriptivo: desviación estándar, medias, coeficiente de variación, máximo y mínimo. Se realizó una comparación de medias de Tukey con nivel de significancia  $p < 0,05$  para evaluar la existencia de diferencias significativas entre cada una de las propiedades del suelo, uso de suelo y profundidad de muestreo. Para determinar la correlación entre las propiedades del suelo y el carbono orgánico, se realizó un cuadro comparativo donde se observa el coeficiente de correlación de Spearman, el cual varía entre -1 a 1, indicando una correlación perfecta positiva cuando se acerca a 1 y perfecta negativa cuando se acerca a -1, cuando el valor de correlación se acerca a 0 se establece como débil o no perfecta (Anexo B); para reducir la dinamización y explicar la variación total de los datos se realizó un análisis de componentes principales. El análisis de los datos se realizó a través del programa estadístico Minitab 19.

### 3.4 Resultados y discusión

#### 3.4.1 Caracterización de las propiedades químicas del suelo

##### pH y conductividad eléctrica

El comportamiento del pH y la conductividad eléctrica en los suelos evaluados en el humedal Laguna de la Cocha se observa en Tabla 11. Los valores de pH en agua (pH) presentaron una media de 5,1, 5,3 y 5,3, y pH en cloruro de potasio (pH<sub>K</sub>) de 4,8, 4,9 y 4,9

para cultivo de papa, páramo y pasto kikuyo respectivamente. Estos valores coinciden con lo reportado por Blasco [144] para andisoles del departamento de Nariño.

Los usos de suelo estudiados en el humedal Laguna de la Cocha, son suelos muy fuerte y fuertemente ácidos, característica típica de andisoles [33]. No se encontró diferencias significativas para el pH por uso de suelo ni en profundidad ( $p < 0,05$ ). Estos resultados indican que la acidez del suelo tiene una relación directa con la génesis y no con el uso de suelo. Según Shoji et al., [95], la acidez en andisoles es común en aquellos suelos que tienen condiciones de pérdida de cationes por lixiviación.

**Tabla 11.** pH del suelo bajo las condiciones estudiadas.

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	pH			pH <sub>κ</sub>		
Cultivo de papa	5,3 a	4,9 a	5,1 a	5,0 a	4,5 a	4,8 a
Pasto kikuyo	5,2 a	5,3 a	5,3 a	5,1 a	5,0 a	4,7 a
Páramo	5,0 a	5,2 a	5,3 a	5,1 a	4,8 a	4,9 a

pH: pH en agua. pH<sub>κ</sub>: pH en cloruro de potasio. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por uso de suelo y profundidad de muestreo.

El valor promedio de conductividad eléctrica (CE) varió entre  $0,06 \text{ dSm}^{-1}$ ,  $0,14 \text{ dSm}^{-1}$  y  $0,25 \text{ dSm}^{-1}$  en suelos bajo condición de páramo, pasto kikuyo y cultivo de papa respectivamente (Tabla 12). Se encontró diferencias significativas por uso de suelo ( $p < 0,05$ ), pero no por profundidad de muestreo ( $p = 0,489$ ), lo que indicaría que las actividades antrópicas llevadas a cabo en suelos bajo cultivo de papa, tienden a aumentar los valores de CE, en especial aquellas relacionadas con la aplicación de pesticidas y fertilizantes, como lo sugiere Reza et al., [145]. Según la clasificación de Rakshit et al., [119] estos suelos se catalogan como no salinos por poseer una  $CE < 2 \text{ dSm}^{-1}$ , lo que estaría asociado a condiciones de ambientes percolantes donde el agua de infiltración lava las sales presentes al interior del perfil de suelo [146].

**Tabla 12.** Conductividad eléctrica del suelo bajo las condiciones estudiadas.

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	CE ( $\text{dSm}^{-1}$ )		
Cultivo de papa	0,31 a	0,26 a	0,19 a
Pasto kikuyo	0,16 b	0,13 b	0,13 b
Páramo	0,05 b	0,05 b	0,08 b

CE: conductividad eléctrica. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por uso de suelo.

Los resultados encontrados son similares a los reportados por Chai et al., [147] ( $0,1 \text{ dSm}^{-1}$ ), en páramos de Costa Rica. La CE de pasto kikuyo evaluados en andisoles del norte de Antioquia, presentan valores superiores a los encontrados en esta investigación ( $0,3-1,2 \text{ dSm}^{-1}$ ) [148]. Así mismo los valores de CE encontrados bajo condición de cultivo de papa,

coinciden con lo reportado por Parelho et al., [149] ( $0,3 \text{ dSm}^{-1}$ ) en andisoles de Portugal cultivados con hortalizas.

### Fósforo disponible

El fósforo disponible (P) en el suelo, para los diferentes usos fue de  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $16 \text{ mg.kg}^{-1}$  y  $7 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos bajo cultivo de papa, páramo y pasto kikuyo respectivamente (Tabla 13). Se encontró diferencias significativas por uso de suelo ( $p < 0,05$ ), pero no por profundidad de muestreo ( $p = 0,175$ ). El suelo cultivado presentó el valor más alto en comparación a suelos de páramo y pasto kikuyo debido a la preparación del suelo para procesos agrícolas [150], en el cual se aplican fertilizantes fosfatados en grandes cantidades durante la siembra y todo el ciclo del cultivo. En los tres usos de suelo evaluados se observó un alto contenido de P disponible según la clasificación de Quintero [151].

Los contenidos de P disponible encontrados en esta investigación distan de lo reportado por Arteaga et al., [152] en suelos cultivados con papa ( $200,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y pasto kikuyo ( $20,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) en andisoles de Nariño, son similares a lo reportado por Ramírez & Rodríguez [153] en andisoles bajo pasto kikuyo de la provincia de Sumapaz, Cundinamarca ( $6-6,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). En el caso del suelo de páramo se observaron valores superiores a los reportados por Montes et al., [100] ( $8,17 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) en páramos de Cundinamarca.

**Tabla 13.** Fosforo disponible ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) del suelo bajo las condiciones estudiadas.

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	P ( $\text{mg. Kg}^{-1}$ )		
Cultivo de papa	44,0 a	28,0 a	18,3 a
Pasto kikuyo	8,3 b	6,3 b	6,7 b
Páramo	15,3 b	17,0 b	16,0 b

P: Fosforo. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por uso de suelo.

### Nitrógeno total

El contenido de nitrógeno total (N) en el suelo fue de entre  $0,81\%$ ,  $0,74\%$  y  $0,34\%$  en suelos bajo cultivo de papa, pasto kikuyo y páramo respectivamente (Tabla 14). Se encontró diferencias significativas entre los usos de suelo ( $p < 0,05$ ), pero no por profundidad de muestreo ( $p = 0,375$ ).

Según la clasificación del IGAC [154], los suelos evaluados en esta investigación poseen un contenido de nitrógeno medio para páramo, y alto para pasto kikuyo y cultivo de papa. Este comportamiento estaría atribuido a la lenta descomposición de la MO en suelos de páramo, causando una baja disponibilidad de nitrógeno en el suelo, mientras que las actividades antrópicas realizadas en suelos bajo cultivo de papa y pasto kikuyo, como la aplicación de fertilizantes, favorecen los procesos de mineralización de nitrógeno [155].

El porcentaje de N en suelos bajo cultivo de papa y pasto kikuyo son similares entre sí, y difieren del suelo bajo condición de páramo. Los resultados encontrados coinciden con lo

reportado por Diaz et al., [156] en andisoles bajo pasto kikuyo (0,8%) y difieren con el contenido de nitrógeno bajo cultivo de papa (0,5%). El contenido de nitrógeno en suelos de páramo es inferior al reportado por Carúa et al., [157] (0,43%) en páramos Ecuatorianos y Estupiñán et al., [150] (0,7-0,8%) en el páramo El Granizo, Cundinamarca.

**Tabla 14.** Contenido de Nitrógeno (%) del suelo bajo las condiciones estudiadas.

<b>Profundidad (cm)</b>	0-5	5-15	15-30
<b>Uso de suelo</b>	<b>N (%)</b>		
Cultivo de papa	0,89 a	0,76 a	0,78 a
Pasto kikuyo	0,82 a	0,76 a	0,64 a
Páramo	0,31 b	0,33 b	0,40 b

N: Nitrógeno. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo.

### Materia orgánica

La Tabla 15 muestra el contenido de materia orgánica (MO) en los suelos evaluados. Se encontró diferencias significativas por uso de suelo y profundidad de muestreo ( $p < 0,05$ ), con medias de 26,7%, 15,6% y 12,6% en suelos de páramo, pasto kikuyo y cultivo de papa respectivamente. El mayor contenido de MO se encontró a una profundidad de 0-5 cm, con disminución progresiva a medida que se incrementa la profundidad del perfil en todos los usos de suelo.

Los valores reportados en esta investigación corresponden a suelos con alto contenido de materia orgánica ( $>10\%$ ) [154], lo cual coincide con lo expuesto por Gómez y Badía [158] en andisoles del mundo; en este orden de suelo se evidencian complejos órgano minerales muy estables que favorecen la acumulación de MO a diferencia de otros de suelos, lo que permite explicar por qué existe mayor contenido de MO en los cinco (5) primeros cm de profundidad del suelo, toda vez que dichos complejos incrementan la resistencia al ataque de los microorganismos y por ende su descomposición [159].

**Tabla 15.** Contenido de materia orgánica (%) del suelo con diferentes usos estudiados.

<b>Profundidad (cm)</b>	0-5	5-15	15-30
<b>Uso de suelo</b>	<b>MO (%)</b>		
Cultivo de papa	15 a	12,8 a	10,2 a
Pasto kikuyo	19,8 a	14,5 a	12,7 a
Páramo	29,2 b	28,9 b	22,1 b

MO: materia orgánica. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo.

El porcentaje promedio de MO en suelos de páramo es superior a lo observado en suelos bajo pasto kikuyo y cultivo de papa debido a que las prácticas agrícolas llevadas a cabo en estos suelos tienden a disminuir la cobertura vegetal natural, incrementando la exposición del suelo y limitando la calidad y cantidad de residuos que entran al mismo. Según Rakshit et al., [119], la tasa de mineralización de la MO es superior en suelos cultivados y con aplicación de fertilizantes, que en aquellos que no han sido sometidos a actividades antrópicas, especialmente por la ruptura de agregados del suelo.

Los valores encontrados en esta investigación son superiores a lo reportado por Cantú et al., [160] en andisoles cultivados con papa (5%-9%), y en el caso del pasto kikuyo duplican a lo encontrado en andisoles de Nariño (7%). Los valores obtenidos en el suelo de páramo de esta investigación, superan a lo encontrado en el páramo de Belmira, Antioquia (14%) y coinciden con lo encontrado en el páramo de Chingaza, Cundinamarca (26%) [161].

### **3.4.2 Caracterización de las propiedades biológicas del suelo**

#### **Biomasa microbiana**

La biomasa microbiana (BM) es considerada el componente vivo de la MOS, la cual influye en la circulación de nutrientes esenciales en el funcionamiento del suelo [162]. La Tabla 16 muestra los resultados de la biomasa microbiana (BM), carbono de la biomasa microbiana (CBM), nitrógeno de la biomasa microbiana (NBM) y relación carbono nitrógeno, para los tres usos de suelo estudiados a una profundidad de 0-5 cm.

Los valores de BM presentaron diferencias significativas por uso de suelo ( $p < 0,05$ ). El suelo bajo pasto kikuyo presentó mayor BM, siendo 1,56 y 4,12 veces superior al suelo de páramo y cultivo de papa, respectivamente, comportamiento derivado de la movilización de sustrato para los microorganismos a través de la actividad radicular y rizosfera del pasto perenne [163]. Este comportamiento también fue reportado por Ordoñez et al., [164], quienes evaluaron la BM en andisoles del departamento del Cauca bajo bosque natural y pastura perenne, encontrando valores superiores bajo esta última condición en comparación a suelos bajo cobertura vegetal natural.

El CBM fue superior estadísticamente en suelos bajo condición de páramo ( $446 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y pasto kikuyo ( $360 \text{ mg kg}^{-1}$ ) respecto al suelo cultivado con papa ( $90,5 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ). Esta tendencia cambia para NBM puesto que en suelos bajo cultivo de papa y pasto kikuyo no se presentó diferencias estadísticas significativas entre sí ( $6,10$  y  $5,89 \text{ mg.kg}^{-1}$ , respectivamente), valores que se encuentran por debajo de la media observada en el suelo de páramo ( $11,39 \text{ mg.kg}^{-1}$ ).

Los resultados anteriores podrían deberse a la composición y diversidad de materiales vegetales en suelo de páramo que favorecen la actividad microbiana en la parte superficial del suelo. Lo reportado en esta investigación coincide con lo expuesto por Xu et al., [165] y Bolat [166], quienes plantean que a mayor calidad del sustrato y menor actividad microbiana, mayor será el valor de CBM y NBM, por lo que se relaciona a la biomasa microbiana con una mayor disponibilidad de nutrientes [167], cuyo valor es influenciado por variables como humedad de suelo y precipitación [168].

**Tabla 16.** Contenido de biomasa microbiana, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana y relación carbono nitrógeno por uso de suelo.

Uso de suelo	BM	CBM (mg.kg <sup>-1</sup> )	NBM (mg.kg <sup>-1</sup> )	C:N
Cultivo de papa	14,8 b	90,5 b	6,1 b	9,1 b
Pasto kikuyo	61,1 a	360,1 a	5,9 b	12,2 b
Páramo	39,1 ab	446,1 a	11,4 a	49,4 a

BM: biomasa microbiana, CBM: carbono de la biomasa microbiana, NBM: nitrógeno de la biomasa microbiana, C:N: relación carbono-nitrógeno. Datos reportados para 0-5 cm de profundidad. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo.

Las variaciones observadas entre el CBM y NBM en los suelos evaluados se deben a las diferentes entradas y salidas de carbono y nitrógeno en cada uso de suelo, especialmente aquellas que están relacionadas con el suelo cultivado con papa debido a la sensibilidad de los microorganismos al manejo de suelo [169]. Hernández & López [170] mencionan que dicho manejo cambia las condiciones físicas y químicas del suelo, impidiendo el desarrollo de vida microbiana. Investigaciones de Durango et al., [171] evidencian una disminución de CBM asociado a cultivos intensivos (>10 años) en andisoles.

Smith & Conen [172] reportan mayor actividad microbiana en suelos bajo cobertura vegetal natural que en aquellos que se encuentran cultivados. El material vegetal generado en suelos sin actividad antrópica es empleado por las poblaciones microbianas como sustrato de C y N, lo que favorece al incremento de BM. La concentración de CBM y NBM bajo cultivo de papa, favorece la disminución de la disponibilidad de carbono procedente de la materia orgánica, relacionado con la mineralización de la MOS, estos resultados coinciden con lo encontrado en el apartado “propiedades químicas” de este estudio, mientras que el comportamiento de la BM bajo la condición de pasto kikuyo podría atribuirse a una mayor biomasa radicular, que estimularía el desarrollo de la población microbiana.

Los valores encontrados en esta investigación para CBM y NBM son superiores al promedio mundial en oxisoles y ultisoles bajo cobertura vegetal natural y cultivo reportados por Kimble et al., [173]. Según Castro [174] el alto contenido de sustancias orgánicas y minerales en suelos de orden andisol, permite que se albergue mayor biomasa microbiana que en otros ordenes de suelo. El CBM y NBM, al igual que el COS, se ven afectados por el material parental y la mineralogía del suelo.

En cuanto a la relación C:N se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los diferentes usos de suelo, siendo superior en suelos bajo condición de páramo (49,4), seguido de pasto kikuyo (12,2) y cultivo de papa (9,1). De acuerdo con Heuck et al., [175], el suelo bajo condición de páramo presentó una mayor inmovilización del N debido a la competencia de los microorganismos, mientras que los suelos bajo condición de pasto kikuyo y cultivo de papa, tienen una mayor mineralización del N.

## Respiración basal

La respiración basal (RB) es un “indicador de la actividad microbiana” que refleja la cantidad y calidad de las fuentes de carbono [162]. La tasa de RB en el suelo de páramo presentó el valor promedio significativamente más bajo ( $202,3 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ), en comparación al suelo cultivado con papa ( $294,6 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) y pasto kikuyo ( $324,9 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) (Tabla 17).

El suelo bajo condición de páramo mostró ser media en cantidad de BM en comparación a los otros usos de suelo estudiados, sin embargo, al observar los valores de RB se puede apreciar que esta comunidad microbiana es menos activa y por ello la liberación de  $\text{CO}_2$  es menor, mientras que el suelo cultivado, el cual presentó la menor BM de los tres usos de suelo, resultó con un promedio de respiración basal estadísticamente igual al suelo de pasto kikuyo, infiriendo una mayor actividad microbiana. Maia et al., [176] reportan mayor valor de RB con la adición de residuos orgánicos y la relación con una reserva de carbono lábil, situación que se presentan en los uso de suelo cultivo y pasto respectivamente.

Los valores de RB reportados, indican que no existe una relación entre esta variable y los contenidos de MOS, lo que difiere de lo expuesto por Zagal y Córdova [177] y Joergensen & Castillo [178], debido a que el suelo de páramo presenta menor valor de RB, indicando que la actividad microbiana puede verse ralentizada debido a las condiciones ambientales de temperatura ( $<6^\circ\text{C}$ ) y humedad (82%). Adicionalmente la influencia de la MO sobre la actividad de la BM viene dada principalmente por la calidad de esta, más allá que por la cantidad, la presencia en mayor o menor medida de fracciones recalcitrantes, así como la calidad de los sustratos incorporados tienen mayor influencia en sobre la actividad del pool de microorganismos.

A diferencia de las propiedades físicas y químicas del suelo, las biológicas deben analizarse en conjunto pues están estrechamente relacionadas. En este sentido, el comportamiento de la respiración basal y la biomasa microbiana también debe ser entendidas a través de relaciones que expresen el comportamiento de los microorganismos en el suelo. Anderson & Domsch [179] proponen el índice metabólico (IM) y coeficiente metabólico, expresado como  $q\text{CO}_2$ , el primero explica el contenido de COS atribuido a la biomasa microbiana, mientras que el  $q\text{CO}_2$  es catalogado como un indicador de la eficiencia metabólica de la comunidad microbiana en relación al uso del carbono orgánico.

**Tabla 17.** Respiración basal, índice y coeficiente metabólico por uso de suelo

Uso de suelo	RB	$q\text{CO}_2$	IM
Cultivo de papa	294,6 a	3,24 a	10,38 b
Pasto kikuyo	324,9 a	0,91 b	31,39 a
Páramo	202,3 b	0,46 c	26,35 a

RB: respiración basal ( $\text{mgCO}_2 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ).  $q\text{CO}_2$  coeficiente metabólico. IM: Índice metabólico. Datos analizados a 0-5 cm. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) por uso de suelo.

El  $qCO_2$  en los usos de suelo evaluados presentó diferencias significativas, siendo superior en el suelo cultivado con papa (3,24), seguido de pasto kikuyo (0,91) y páramo (0,46), lo que podría significar que la comunidad microbiana en la condición de páramo no solo es mayor en su tamaño sino que es más eficiente en el uso del C que en los otros dos usos de suelo estudiados, corroborado al observar la relación C:N (49,4) (Tabla 16), cuyo valor evidencia la ocurrencia de procesos de inmovilización y luego de mineralización. Insam & Domsch [180] mencionan que valores bajos de  $qCO_2$  estarían asociados a sustratos recalcitrantes, lo que implicaría un mayor gasto energético para catabolizar el  $CO_2$ , al igual que la utilización más eficiente de la materia orgánica [181]. Por su parte, el  $qCO_2$  del suelo bajo cultivo de papa indicaría una condición de estrés fisiológico de la comunidad microbiana asociada al manejo del suelo y una reducción proporcional del CBM debido a la contaminación por uso de agroquímicos [182]. Cabe destacar que en los suelos bajo condición de cultivo de papa y pasto kikuyo evidencian la ocurrencia de procesos de mineralización al encontrar relaciones C:N < 30 (Tabla 16) [183].

A diferencia del  $qCO_2$ , el IM fue superior en suelos bajo condición de pasto kikuyo (31,39) y páramo (26,35) e inferior en el suelo cultivado con papa (10,38), lo que indica que el COS en la condición de pasto kikuyo y páramo está conferido, en mayor medida, al CBM en comparación a cultivo de papa. Los resultados encontrados son coherentes debido a que los valores de BM reportados son superiores en el suelo bajo condición de pasto kikuyo y páramo (Tabla 16), en este sentido la comunidad microbiana del suelo bajo estas condiciones se esperaría fuera más eficiente usando el carbono y almacenándolo como CBM [184].

### 3.4.3 Caracterización de las propiedades físicas del suelo

#### Densidad real

La Tabla 18 muestra los valores de Dr encontrada bajo los usos de suelos estudiados. El mayor valor se presentó en el suelo de páramo, siendo significativamente mayor con relación a cultivo de papa y pasto kikuyo.

**Tabla 18.** Densidad real por uso de suelo y profundidad de muestreo

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	Dr (g. cm <sup>-3</sup> )		
Cultivo de papa	2,11 b	2,13 b	2,17 b
Pasto kikuyo	2,13 b	2,10 b	2,14 b
Páramo	2,60 a	2,38 a	2,40 a

Dr: densidad real. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo

A pesar de las diferencias significativas encontradas para los usos de suelo, los valores de Dr se encuentran en el rango característico de los andisoles (1,8 y 2,8 g cm<sup>-3</sup>) [185]. El valor de Dr en suelos de páramo tiende a ser superior al suelo bajo cultivo de papa y pasto

kikuyo, como respuesta al mayor porcentaje de microagregados contenidos en este uso de suelo (ver capítulo 4). Sin embargo, la Dr es considerada como una de las propiedades físicas del suelo que difícilmente se ve afectada por el uso [186], siendo común asumir una Dr de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$  debido a que está más asociada a la densidad del cuarzo (predominante en los suelos minerales) [185], en este sentido varios autores [187][188][189] exponen que la Dr tendría una mayor relación con la mineralogía del suelo.

### Textura del suelo

Los usos de suelo estudiados presentaron clases texturales que varían entre franca, franco arenosa y arenosa franca (Tabla 19). Este comportamiento, típico en andisoles, ha sido reportado por autores como Maeda et al., [190], Imbellone & Barbosa [191] y Broquen et al., [192], quienes asocian la gran cantidad de arena, encontrada por metodologías tradicionales como Bouyoucos, a la protección ejercida por los minerales amorfos sobre las arcillas, formando agregados del tamaño de limo o arena, denominados según Perestelo [193] como pseudolimos o pseudoarenas.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la distribución de partículas (textura) según el uso de suelo (Tabla 19), no se encontraron diferencias estadísticas para la variable mencionada por profundidad. El suelo de páramo presentó un contenido promedio de arena de 71%, siendo significativamente superior al suelo cultivado con papa (45%) y pasto kikuyo (42%). Para la fracción limo, los porcentajes varían entre 36% a 44% en el suelo cultivado y 40 a 44% en pasto kikuyo, superiores significativamente al suelo de páramo (12% a 26%). Finalmente, en la fracción arcilla, el porcentaje de arcilla en el suelo cultivado y pasto kikuyo (15%) fue superior significativamente al suelo bajo condición de páramo (8%).

**Tabla 19.** Textura por uso de suelo

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30	0-5	5-15	15-30	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	A (%)			L(%)			Ar(%)		
Cultivo de papa	50 b	40 b	46 a	36 a	44 a	38 a	14 a	16 a	16 a
Pasto kikuyo	36 b	42 b	48 a	44 a	44 a	40 a	20 a	14 a	12 a
Páramo	64 b	66 b	84 b	26 b	22 b	12 b	10 b	12 b	4 b

A: arena, L: limo, Ar: arcilla. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas por uso de suelo ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 20.** Clase textural por uso de suelo y profundidad de muestreo

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	Clase textural		
Cultivo de papa	Franco	Franco	Franco
Pasto kikuyo	Franco	Franco arenoso	Franco
Páramo	Franco arenoso	Franco arenoso	Arenoso franco

De este modo la clase textural predominante bajo condición de cultivo de papa y pasto kikuyo es franca (Tabla 20), es decir, que sus partículas finas y gruesas se encuentra mejor

balanceada que en otras clases texturales, condición que favorece a las actividades agrícolas y disponibilidad de agua y nutrientes [186], mientras que en el suelo de páramo predomina la clase textural franco arenoso (Tabla 20). Los valores encontrados en esta investigación coinciden con lo encontrado por Otero et al., [194] en páramos del Cauca, al igual que lo reportado por Mejía et al., [195] en andisoles bajo cultivo de papa y kikuyo del Valle del Cauca.

### Porosidad total

El porcentaje de porosidad total (PT) encontrado en los usos de suelo estudiados varió entre 70%, 74% y 80% en suelos bajo cultivo de papa, pasto kikuyo y páramo respectivamente (Tabla 21). Se encontraron diferencias significativas por uso de suelo ( $p < 0,05$ ), pero no por profundidad de muestreo ( $p = 0,292$ ). El porcentaje de PT se encuentra dentro del rango reportado por Shoji et al., [95] para andisoles (60-80%), clasificados como suelos con alta porosidad ( $>40\%$ ). Este comportamiento está relacionado con la baja densidad aparente (ver capítulo 2) y el alto contenido de materia orgánica [187][196], especialmente en suelos bajo condición de páramo [197].

**Tabla 21.** Porosidad total por uso de suelo y profundidad de muestreo.

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30
Uso de suelo	PT (%)		
Cultivo de papa	73,0 b	70,2b	66,6 b
Pasto kikuyo	79,4ab	72,9ab	69,5ab
Páramo	78,7 a	75,2 a	85,6 a

PT: porosidad total. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) por uso de suelo

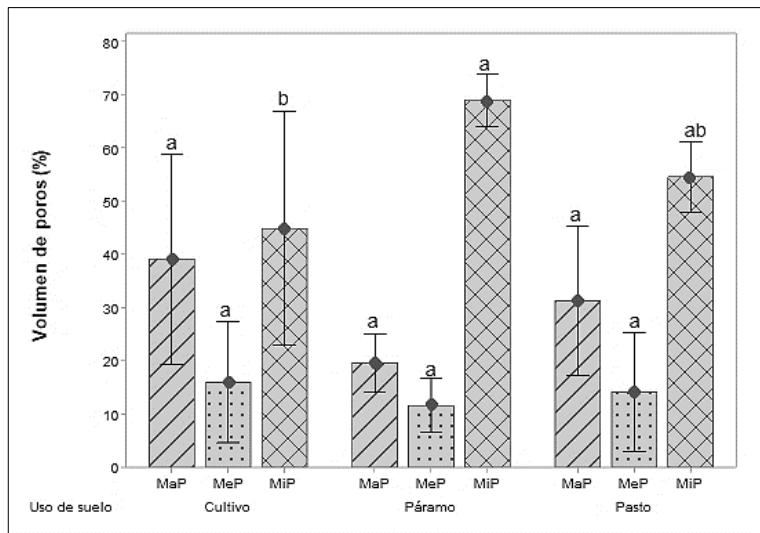
Los valores encontrados en el suelo cultivado con papa coinciden con la investigación de Volverás et al., [198] (72%) en andisoles bajo el mismo cultivo en el departamento de Nariño, y son superiores a lo reportado por Apréiz & Moncayo [199] (63%) bajo pasto kikuyo en el mismo departamento; la PT en suelos de páramo es superior a lo reportado por Daza et al., [200] (68%) en el páramo de Sumapaz, Cundinamarca, y Robert [201] (65%) en suelos de páramo de Ecuador.

La distribución de poros por uso de suelo se observa en la Figura 11. El porcentaje de macroporos (MaP) no presentó diferencias estadísticas significativas entre los usos de suelo estudiados, se reportan valores superiores para esta variable en suelos bajo condición de cultivo de papa (39%) y pasto kikuyo (31%), con relación al suelo de páramo (20%). Según Ceballos et al., [202] y Carrasco et al., [203] los MaP están estrechamente relacionados con la Da y la estructura del suelo, lo que respondería al leve incremento de MaP bajo estas condiciones de uso.

Los mesoporos (MeP) están relacionados con el agua y el aire disponible para las plantas [204]. Los valores reportados no superan el 16% y están influenciados por el bajo porcentaje de agua disponible (ver capítulo 4). Al igual que los MaP, no se encontraron diferencias significativas por uso de suelo, y se observa la misma tendencia: cultivo de papa > pasto kikuyo > páramo. El comportamiento de MaP y MeP, superiores en pasto kikuyo

y cultivo de papa, podría ser el resultado del sistema radicular que forma bioporos bajo estas dos condiciones, al igual que el desarrollo de labranza [205].

En los microporos (MiP) el agua es retenida con mayor fuerza y no está disponible para las planta [192]. La proporción de MiP en todos los usos de suelo estudiados superó el 40%. El suelo bajo condición de páramo fue estadísticamente superior (69%) a pasto kikuyo (55%) y cultivo de papa (45%), comportamiento atribuido al alto contenido de materia orgánica [187] o a la presencia de altos contenidos de arena fina y muy fina dentro de la distribución de partículas dada la textura franco arenosa reportada para este uso, toda vez que debido a su tamaño, los MiP se encuentran dentro de los agregados del suelo [206] e interfieren en el secuestro de carbono [207][208].



**Figura 11.** Distribución de poros por uso de suelo

MaP: macroporos, MeP: mesoporos, MiP: microporos. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo en cada tamaño de poro. Las barras indican desviación estándar.

### 3.4.4 Relación entre propiedades del suelo

El análisis de correlación entre el COS y las propiedades físicas, químicas y biológicas, por uso de suelo y profundidad evaluada se muestra en el Anexo B. El suelo bajo condición de pasto kikuyo presentó correlaciones directas significativas entre el COS, N ( $r=0,912$ ), MO ( $r=0,996$ ) y %Ar ( $r=0,767$ ), e inversas con %A ( $r=-0,767$ ). El suelo bajo condición de cultivo de papa solo se correlacionó significativamente con MO ( $r=1,000$ ).

En el suelo bajo condición de páramo se encontraron correlaciones positivas y significativas entre el COS, PT ( $r=0,717$ ), % Ar ( $r=0,685$ ) y % L ( $r=0,738$ ); y correlaciones significativamente negativas con %A ( $r=-0,738$ ). Paralelamente el CBM ( $r=0,733$ ) y NBM ( $r=0,667$ ) se correlacionaron significativamente en todas las condiciones de uso de suelo a una profundidad de 0-5 cm. Los coeficientes de correlación entre el COS con pH, CE, P y Dr, no resultaron significativos, permitiendo inferir que no existe para el caso de los usos de suelo estudiados un efecto directo de estas variables sobre la acumulación de COS

La correlación directa significativa entre COS, MO, CBM y NBM en todas las condiciones de uso de suelo, ha sido ampliamente estudiada [209][183][210][120]., bajo el principio que el COS es el principal componente de la MO. A mayor contenido de MO, mayor concentración de COS en el suelo [27].

La correlación directa entre el COS, CBM y NBM, podría explicarse por el efecto que tiene el carbono orgánico en la biomasa microbiana, tal y como lo menciona Kandeler et al., [211], quienes encontraron que altos contenido de MOS y compuestos orgánicos fácilmente disponibles, incrementan la actividad de la BM por considerarse “fuente de energía”.

Suelos bajo condición de pasto kikuyo y páramo se relacionaron directamente con % arcilla y % limo (suelo de páramo), e inversamente con % arena, lo que coincide con lo reportado por Iwasaki et al., [212] en andisoles de Japón. Este comportamiento podría estar atribuido a la protección que ejercen las partículas de arcilla sobre la MOS, debido a que posee una elevada superficie específica, permitiendo la adsorción de MO [102].

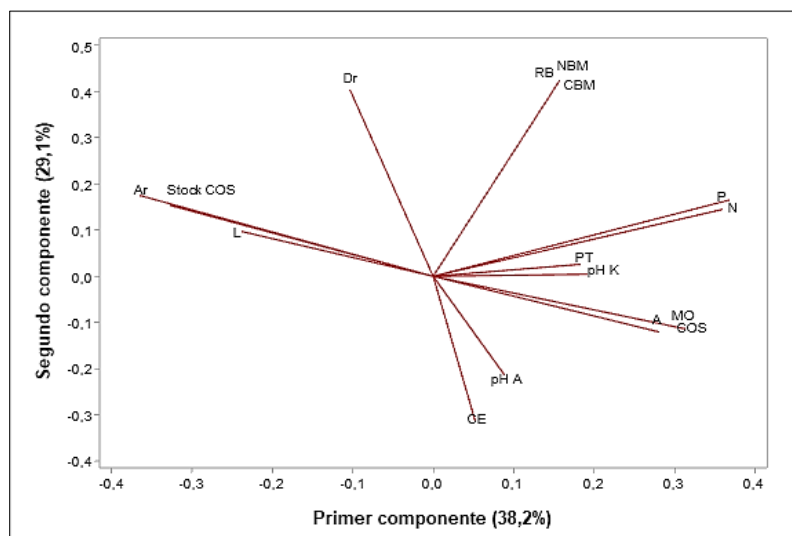
Según Díaz et al., [156], el contenido de carbono asociado a la fracción limo, también podría indicar que el COS se acumula en poros finos dentro de los agregados formados por esta partícula. Muñoz et al., [213] mencionan que texturas finas (arcilla y limo) ejercen una protección fisicoquímica de la MO formando microagregados y disminuyendo la tasa de descomposición (ver capítulo 4), mientras que el COS asociado a la fracción de arena se encuentra más expuesta al ataque microbiano por ser más lábil y de fácil descomposición al desarrollo de actividades antrópicas como el laboreo [69].

La correlación directa entre el COS y N en suelos bajo condición de pasto kikuyo se explica por la relación C:N, la cual muestra una mineralización del nitrógeno debido a la estimulación microbiana, esta relación muestra la existencia de suficiente carbono para ser utilizado como fuente de energía [214], esto implicaría una mejor eficiencia de los microorganismos para descomponer la MOS. Fontes et al., [215] mencionan que la disponibilidad de N regula el crecimiento vegetal y por lo tanto incrementa la fijación de COS. Estos resultados coinciden con lo reportado por Zagal & Cordova [177] y Undurraga et al., [216] en andisoles de Chile.

Finalmente, la correlación directa significativa entre el COS y la PT coincide con lo expuesto por Bronick & Lal [217], Naveed et al., [218] y Meza & Geissert [219], quienes mencionan que la MO afecta directamente el comportamiento de los poros en el suelo, especialmente los de mayor tamaño, los cuales facilitan el flujo de aire y agua y por lo tanto el almacenamiento de carbono. Iwasaki et al., [212], caracterizan a la MOS como un agente aglutinante que estabiliza y promueve la agregación del suelo reflejado en un aumento de porosidad. Esto coincide con lo encontrado en esta investigación y lo reportado en el capítulo 4.

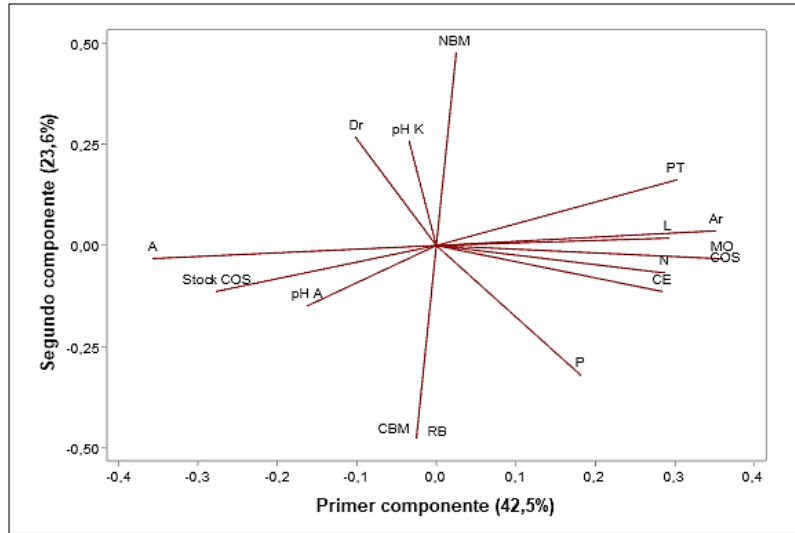
### 3.4.5 Análisis de componentes principales de acuerdo con el uso de suelo

El análisis de componentes principales (ACP) para el suelo cultivado con papa se explicaría a partir de los dos primeros componentes (67,3% de la variabilidad total de los datos) (Figura 12), las variables relacionadas con el almacenamiento de COS resultaron ser Dr y % arcilla en cuanto a propiedades físicas; P, N, MO, COS y CE para propiedades químicas; y NBM, CBM y RB para propiedades biológicas. Las propiedades químicas mostraron mayor representatividad y magnitud en el efecto sobre el stock de COS.



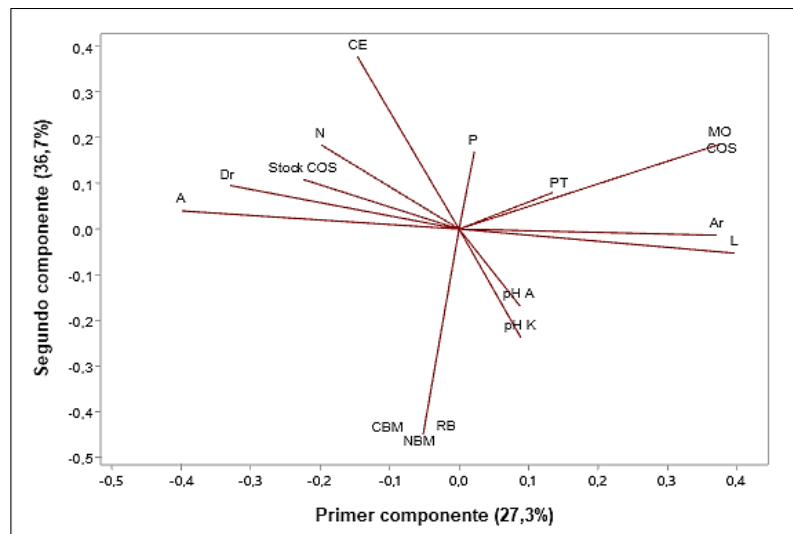
**Figura 12.** ACP para las propiedades del suelo bajo condición de cultivo de papa

El análisis de componentes principales en el suelo bajo condición de pasto kikuyo y las propiedades estudiadas se muestra en la Figura 13. Los dos primeros componentes explicarían el 66,1% de la variabilidad total, representado a través del CP1 con 42,5% y el CP2 con 23,6%. El ACP indica que, para el suelo bajo condición de pasto kikuyo, el stock de COS se encuentra principalmente relacionado con propiedades físicas tales como textura, especialmente a través de las partículas de arcilla y arena, al igual que porosidad total; propiedades químicas como N, CE, COS y MO, y biológicas con CBM, NBM y RB.



**Figura 13.** ACP para las propiedades del suelo bajo condición de pasto kikuyo

En el suelo bajo condición de páramo, el 64% de la variabilidad total se explica a través de los CP 1 y 2, como se observa en la Figura 14. La variable textura a través de los contenidos de arcilla, limo y arena influye sobre el stock de COS, así mismo lo hace la Dr. Por otra parte, propiedades químicas como CE, MO y CO también se relacionan con el stock de COS, al igual que propiedades biológicas tales como RB, CBM y NBM.



**Figura 14.** ACP para las propiedades del suelo bajo condición de páramo

### 3.5 Conclusiones

El uso de suelo influyó significativamente en todas las propiedades físicas, químicas y biológicas evaluadas, a excepción de pH. La profundidad de muestreo solo influyó en el contenido de MOS, cuyo valor disminuyó a medida que se profundiza en el perfil del suelo.

El uso de suelo tiene influencia sobre la eficiencia metabólica de la biomasa microbiana, debido a la actividad entrópica, así como al grado de recalcitrancia de los sustratos que actúan como fuente de energía, la acción del pool de microorganismos en cuanto a su actividad en la activación y/o ralentización de los procesos de mineralización se encuentran atribuidos a múltiples factores que abarcan desde la calidad y cantidad de las fuentes hasta factores como humedad, temperatura y vegetación.

El almacenamiento de carbono en el suelo está influenciado por las propiedades físicas, químicas y biológicas. Variables como MO, CBM, NBM y RB se encuentran relacionadas con el stock de COS independientemente del uso de suelo.

## 4. Capítulo 4. Cambios edáficos asociados al COS

### 4.1 Introducción

El desarrollo agrícola mundial se ha constituido como la base económica y social de los últimos 70 años, predominantemente en países ubicados en la zona tórrida o también llamados países tropicales [220]. Sin embargo, satisfacer la demanda de alimentos ejerce presión y estrés sobre recursos como el suelo, limitando la provisión de servicios ecosistémicos. Según el IPCC [63], desde 1961 la producción de alimentos ha aumentado en un 240%, asociada a “cambios en los hábitos de consumo”. Varios autores [169][221][88], exponen su preocupación frente a la calidad del suelo, entendida, no solo desde el ámbito agrícola, sino desde lo ecosistémico y ambiental.

Aunque el concepto de la calidad del suelo puede variar, varios autores coinciden en que es un indicador cuantitativo y cualitativo de la capacidad que posee el suelo para suministrar “producción biológica y calidad ambiental” [222]. En efecto, Doran et al., [223] menciona que la calidad del suelo debe ser caracterizada a través de indicadores físicos, químicos y biológicos que permitan entender el comportamiento del suelo y que además expongan el grado de afectación por actividades antrópicas asociadas a su uso. Al respecto, Eswaran et al., [32] agregan que la mayoría de cambios y afectaciones en el suelo, a menudo, producen pérdidas significativas en el COS y afectan la capacidad de almacenamiento. Sheikn et al., [150] afirman que entender la dinámica del almacenamiento de COS, es esencial para mantener la calidad y productividad del suelo.

Autores como Fraç et al., [224] y Wang et al., [225] sugieren el empleo de indicadores que reflejen los niveles de degradación del suelo, teniendo en cuenta que la mayoría de los cambios ocurren a largo plazo. Hernández & López [170] aseguran que la estabilidad estructural, estratificación de COS, y retención de agua en el suelo, son índices eficaces a la hora de entender la variación de su calidad con respecto a cambios edáficos. La estabilidad estructural (EE) del suelo es considerada como indicador del deterioro físico debido a prácticas de manipulación y manejo, dichas prácticas influyen en el contenido de la materia orgánica y puede favorecer procesos de erosivos [170][226].

Otro indicador importante es el contenido de humedad del suelo, considerado como una de las variables más estudiadas a la hora de entender el efecto de las actividades antrópicas en el suelo [119][227], factor que determina y produce variaciones en otras

propiedades. Al respecto Martínez et al., [69], señalan que existe una estrecha relación entre las actividades antrópicas, especialmente la agricultura, con la capacidad para regular, mover y almacenar agua en el perfil de suelo.

De la misma manera Franzluebbbers [228] propone el “índice de estratificación” o “grado de estratificación” como indicador del efecto del uso de suelo sobre la distribución del COS con respecto a la profundidad superficial del perfil, en la cual el almacenamiento de COS está fuertemente influenciado por prácticas antrópicas y su relación con una capa inferior con menor impacto. En este capítulo, se determinaron diferentes indicadores que caracterizan los cambios edáficos asociados a las actividades antrópicas bajo tres usos de suelo: páramo, cultivo de papa y pasto kikuyo en la región de la Laguna de la Cocha. Los resultados fueron analizados desde un enfoque integral, permitiendo describir las características particulares y generales del comportamiento de los andisoles en las condiciones de uso de suelo.

## **4.2 Materiales y métodos**

### **4.2.1 Localización del área de estudio**

El humedal Laguna de la Cocha se localiza sobre la cordillera “centro-oriental de los andes”, cuyo origen data del Precámbrico, está rodeada de montañas con pendientes variables y valles fluvio lacustres [73]. La zona de páramo, ubicada entre 3.000 y 3.600 msnm, está conformada por comunidades y especies de frailejón, pajas, helechos y musgos, la cual origina parches de bosques de chaparros, pantanos y turberas. La zona más conservada pertenece al páramo del Bordoncillo [229].

Según Corponariño [73], la base económica de la población se deriva de actividades agrícolas, ganaderas y extractivas a pequeña y gran escala. La actividad agrícola está centrada en cultivos de maíz, papa, flores, arveja y cebolla, las veredas Santa Clara, Campo Alegre y El Motilón son las que concentran la actividad agrícola en la zona. El cultivo de papa representa el 22,75% del total de áreas cultivadas (719 hectáreas). El área bajo pastos corresponde a 8,2% del total de usos de suelo del humedal, de los cuales, el pasto kikuyo representa el 91% “destinado a explotación de especies menores y bovinos”.

### **4.2.2 Toma y procesamiento de muestras de suelo**

Para el análisis de estratificación de carbono y estabilidad estructural se tomaron muestras de suelo disturbadas, almacenadas en bolsas plásticas (2 kg) por uso de suelo a diferentes profundidades, de acuerdo con la metodología propuesta por Montané et al. [75] (**Tabla 22**). Para retención de humedad se tomaron muestras no disturbadas almacenadas en cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de alto. La toma de muestra en todos los casos se realizó bajo diseño experimental descrito en el Capítulo 2.

**Tabla 22.** Número de muestras de suelo para análisis de indicadores edáficos.

Uso de suelo	Profundidad de muestreo (cm)	Muestras para análisis de estratificación de carbono	Muestras para análisis de estabilidad estructural	Muestras para análisis retención de humedad
Pasto kikuyo	0-5	3	3	3
	5-15	3	3	3
	15-30	3	3	3
	30-50	3	3	--
	50-70	--	3	--
	70-100	--	3	--
	<b>Subtotal</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>9</b>
Cultivo de papa	0-5	3	3	3
	5-15	3	3	3
	15-30	3	3	3
	30-50	3	3	--
	50-70	--	3	--
	70-100	--	3	--
	<b>Subtotal</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>9</b>
Páramo	0-5	3	3	3
	5-15	3	3	3
	15-30	3	3	3
	30-50	3	3	--
	50-70	--	3	--
	70-100	--	3	--
	<b>Subtotal</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>9</b>
<b>Total</b>		<b>36</b>	<b>54</b>	<b>27</b>

### 4.2.3 Estratificación del Carbono Orgánico del Suelo

La relación de estratificación del Carbono Orgánico del Suelo (COS) fue calculada a partir de la concentración de carbono orgánico en profundidades superficiales (0-5 cm) y una capa inferior (5-15 cm, 15-30 cm y 30-50 cm), como se observa en la ecuación 4 [228].

**Ecuación 4.**  $Re1 = \frac{CO\ 0 - 5cm}{CO\ 5 - 15\ cm}$      $Re2 = \frac{CO\ 0 - 5cm}{CO\ 15 - 30\ cm}$      $Re3 = \frac{CO\ 0 - 5cm}{CO\ 30 - 50\ cm}$

Donde:

Re1= relación de estratificación del COS entre 0-5 cm y 5-15 cm.

Re2= relación de estratificación del COS entre 0-5 cm y 15-30 cm.

Re3= relación de estratificación del COS entre 0-5 cm y 30-50 cm.

#### 4.2.4 Estabilidad estructural

En el laboratorio del Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia, ubicado en Villavicencio, Meta, se efectuó la prueba de estabilidad de agregados humedecidos por el método de tamizado en húmedo, Yoder (1936) modificado por Pla [230], para lo cual se utilizó un juego de tamices con apertura de malla 6.4mm, 4mm, 2mm, 1mm y 0.5mm (agregados estables o  $\geq 0.5$  mm), y agregados de tamaño 0,25mm (inestables o  $< 0,5$ mm), de acuerdo con la metodología de Pla [230].

El cálculo de diámetro medio ponderado de los agregados se estableció de acuerdo a Lobo & Pulido [231] según la ecuación 5:

**Ecuación 5.**

$$DMP = \sum_{i=1}^n D_i \times P_i$$

Donde:

DMP = diámetro medio ponderado

$D_i$  = diámetro medio de una clase de tamaño dada

$P_i$  = fracción de peso de la clase de tamaño correspondiente

#### 4.2.5 Capacidad de retención de humedad

El contenido y capacidad de retención de humedad se determinó a partir de la metodología propuesta por Montenegro & Malagón [232] y Rowel [142], a través de membranas de cerámica y de ollas de presión a 0, 0,1, 0,3, 3,0, 5,0 y 15,0 bares de presión, en el laboratorio del Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia, ubicado en Villavicencio, Meta. Las muestras de suelo, contenidas en anillos de 5 cm x 5 cm fueron saturados por capilaridad con agua por 24 horas, obteniendo el contenido de humedad a punto de saturación (0 bar) y sometidas posteriormente a diferentes presiones controladas a través de válvulas y manómetros en celdas de porcelana dentro de ollas Richard. Los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente se obtuvieron a presiones de 0,3 y 15 bar respectivamente.

El agua disponible se calculó a través de la ecuación 6, propuesta por Farley et al., [227]

**Ecuación 6.**

$$AD = CC - PMP$$

Donde:

AD= agua disponible (%)

CC= capacidad de campo (%)

PMP= punto de marchitez permanente (%)

## 4.2.6 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos descritos a continuación, se realizaron con base en la metodología propuesta por Webster & Oliver [79]. Los datos de los indicadores edáficos se evaluaron a través de análisis descriptivo: desviación estándar, medias, coeficiente de variación, máximo y mínimo. Se realizó análisis univariado con una comparación de medias de Tukey con nivel de significancia  $p < 0,05$  para evaluar la existencia de diferencias significativas entre cada uno de los indicadores estudiados por uso de suelo y profundidad de muestreo. Finalmente se empleó un análisis de correlación lineal por cada indicador edáfico y el almacenamiento de COS para determinar la existencia de asociación, utilizando el coeficiente de Pearson. El análisis de los datos se realizó a través del programa estadístico Minitab 19.

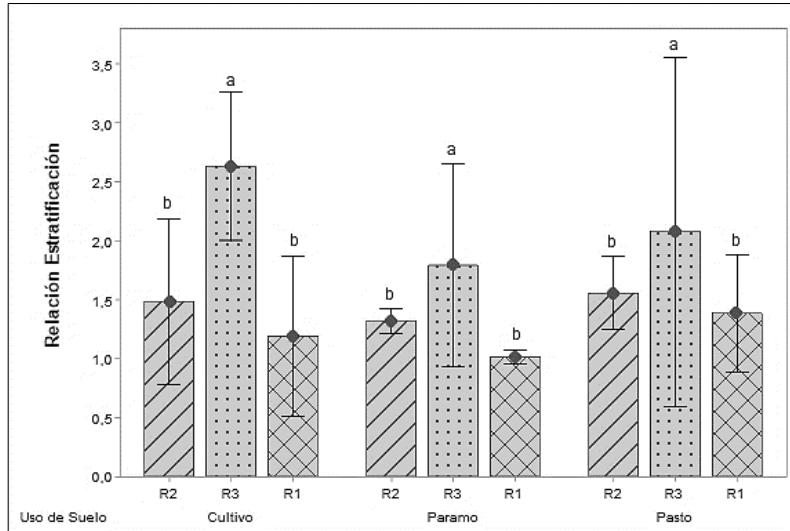
## 4.3 Resultados y discusión

### 4.3.1 Relación de estratificación del COS

El análisis de relación de estratificación del COS permite evaluar los cambios asociados al manejo del suelo y su relación con la tasa de almacenamiento de carbono orgánico [69][233][234]. Como se observa en la Figura 15, se encontraron diferencias significativas por uso de suelo y Re ( $p < 0,05$ ), siendo el valor medio de cultivo de papa (1,8) y pasto kikuyo (1,7), superiores a páramo (1,4) y  $Re3 > Re2 > Re1$  en todos los usos de suelo estudiados.

Según Franzluebbbers [228] los suelos naturales sin desarrollo de actividades antrópicas, tienen propiedades estratigráficas mayor a 2. Sin embargo, este supuesto solo se cumpliría en la Re3 bajo suelos cultivados con papa (2,6) y pasto kikuyo (2,1), toda vez que los valores de Re tienden a incrementar de manera proporcional a medida que la comparación se hace con capas de suelo más profundas [235].

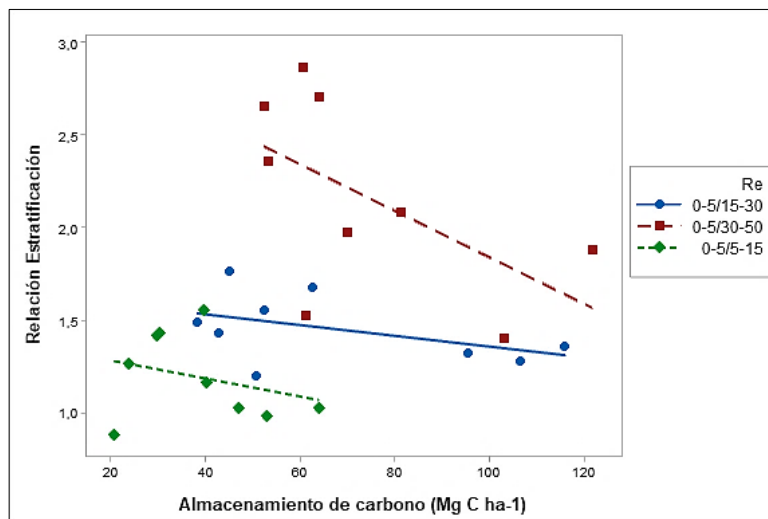
La Re1 y Re2 presentaron valores inferiores en todos los casos, especialmente en suelos de páramo, este comportamiento se debe al alto contenido de COS en los 30 primeros cm del perfil suelo, en los cuales no se observan cambios abruptos en ninguna de las condiciones estudiadas, y estaría más asociado a la acumulación de COS que al resultado del desarrollo de actividades antrópicas, lo que coincide con lo expuesto por Liss et al., [51] para andisoles Colombianos.



**Figura 15.** Relación de estratificación de COS

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo. Las barras indican desviación estándar.

Se realizó un análisis de correlación entre el stock de carbono y las Re como se observa en la Figura 16. Los coeficientes de correlación no mostraron ser estadísticamente significativos en ninguna de las Re, los cuales variaron entre 1,38, 1,65 y 3,09 para Re1, Re2 y Re3 respectivamente. Los datos indican que la Re disminuye a medida que incrementa la tasa de almacenamiento de COS, comportamiento acorde a lo expuesto por Franzluebbers [228]. Estos resultados difieren de lo expuesto por De Moraes & Lal [236] y Zhang et al., [237], en suelos bajo pasturas perennes y cultivo de maíz respectivamente, sus investigaciones muestran una correlación positiva entre Re y el almacenamiento de COS, por lo cual los citados autores consideran estos parámetros como un importante indicador de secuestro de carbono en suelos; cabe aclarar que en dichas investigaciones la concentración de carbono fue bajo (<6%).



**Figura 16.** Relación de estratificación y almacenamiento de carbono

### 4.3.2 Estabilidad estructural de los agregados

La estabilidad estructural (EE) es considerada como una característica edáfica dinámica, que explica la resistencia de los agregados del suelo a procesos y agentes externos como infiltración de agua, labranza, uso de suelo, entre otros [238]. Los resultados encontrados en esta investigación sugieren que la proporción de agregados estables ( $>0,5\text{mm}$ ) e inestables ( $<0,5\text{mm}$ ) no fueron estadísticamente diferentes entre los usos de suelo estudiados.

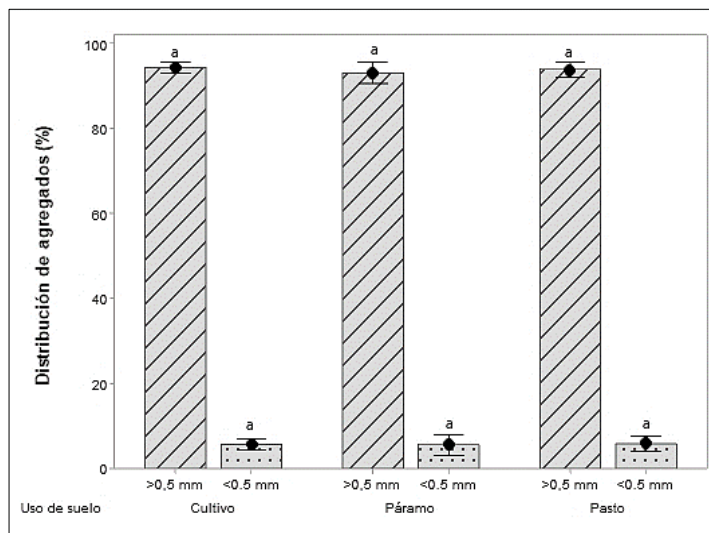
La Figura 17 muestra que el suelo cultivado con papa contiene mayor porcentaje de agregados estables (94,3%), seguido de pasto kikuyo (93,9%) y páramo (93%). Mientras que el mayor porcentaje de agregados inestables se presentó en el suelo de páramo (7%), seguido de pasto kikuyo (6,1%) y cultivo de papa (5,7%). A pesar de no encontrar diferencias estadísticas significativas, el suelo cultivado y pasto kikuyo presentaron el mayor promedio ponderado en comparación a suelos de páramo, comportamiento que coincide con lo expuesto por Salton et al., [239], quienes asocian mayor tamaño de agregados al aporte del COS y la alta densidad de raíces, especialmente raíces finas, en suelo bajo cultivo y pasturas perennes.

Por su parte en el suelo bajo condición de páramo, la disminución de agregados  $>0,5\text{mm}$  fue equivalente al aumento de los agregados  $<0,5\text{mm}$ , esto podría deberse, como se menciona en el capítulo 2, a la predominancia de CAH, los cuales están asociados a partículas de limo y arena fina, que originan la formación de complejo arcillo-húmico [240]. Según Martínez et al., [241], los ácidos húmicos residen en el suelo 1,5 veces más que los AF, contribuyendo a una mayor captura de COS. Lo expuesto anteriormente indicaría que los suelos estudiados en el humedal Laguna de la Cocha, presentan de forma natural una buena agregación y estabilidad estructural, lo que favorece las condiciones físicas del suelo [242]. Paustian et al., [243] aseguran que existe una relación inversa entre la agregación del suelo y los cambios edáficos asociados al desarrollo de actividades antrópicas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Mora et al., [244] y Cadena et al., [245] en andisoles de España y Colombia respectivamente.

Respecto a la profundidad de muestreo no se observó una tendencia definida para el diámetro promedio ponderado de los agregados. Como se muestra en la Tabla 23, los agregados estables a una profundidad de 0-5cm no presentan diferencias estadísticamente significativas. El suelo bajo condición de pasto kikuyo presentó un promedio ponderado de 94,1%, seguido de cultivo de papa (92%) y páramo (90,6%), mientras que los agregados inestables fueron superiores en el suelo de páramo (9,4%), seguido de cultivo de papa (8%) y pasto kikuyo (5,9%).

En la profundidad 5-15 cm no se encontró diferencias estadísticas significativas entre los agregados para los usos de suelo estudiados. La mayor proporción de agregados estables se encontraron en suelos bajo condición de páramo (95,7%) y los inestables en suelos cultivados (6%). Los agregados a la profundidad 15-30 cm, mostraron diferencias estadísticamente significativas en agregados  $>0,5\text{ mm}$ , específicamente en el rango (6,4-

2,0 mm) entre los usos de suelo. La condición de pasto kikuyo con 21,71% presentó mayor porcentaje de agregados estables, seguido de cultivo de papa con 18,34% y páramo 13,89%.



**Figura 17.** Distribución de agregados por uso de suelo

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) por uso de suelo. Las barras indican desviación estándar.

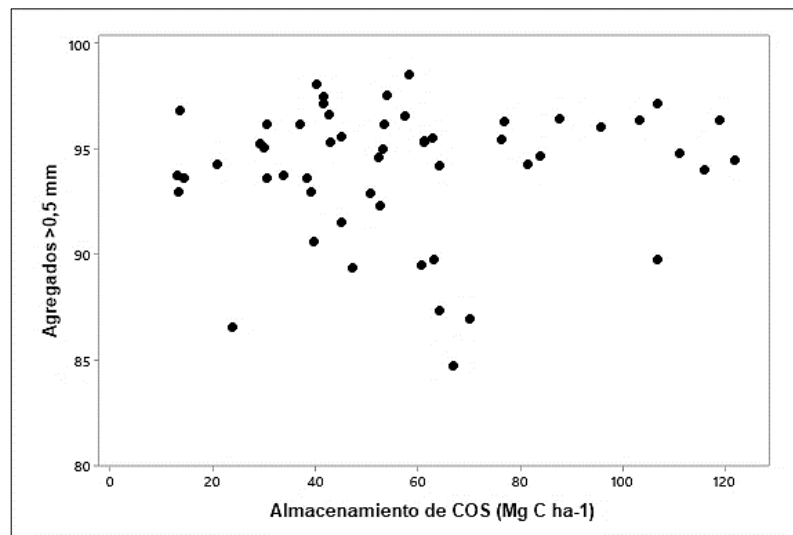
Los agregados estables a una profundidad de 30-50cm resultaron ser estadísticamente diferentes en el rango 6,4 a 4 mm. La proporción de agregados estables dentro de la condición cultivo de papa para este rango fue de 21,39%, mientras que la condición de páramo y pasto kikuyo mostraron un comportamiento similar con 15,96% y 15,27%, respectivamente. Los tamaños de agregados estudiados no mostraron diferencias estadísticamente significativas a las profundidades 50-70 y 70-100 cm entre los usos de suelo.

**Tabla 23.** Distribución de agregados por uso de suelo y profundidad de muestreo

Profundidad (cm)	0-5	5-15	15-30	30-50	50-70	70-100
<b>Uso de suelo</b>	<b>(<math>\geq 0.5\text{mm}</math>)</b>					
Cultivo	92 a	94,0 a	93,4 ab	96,6 a	94,9 a	94,8 a
Pasto	94,1 a	94,4 a	92,2 a	96,8 b	91,7 a	94,1 a
Páramo	90,6 a	95,7 a	95,1 b	93,6 b	93,6 a	89,6 a
<b>Profundidad (cm)</b>	0-5	5-15	15-30	30-50	50-70	70-100
<b>Uso de suelo</b>	<b>(<math>\leq 0.5\text{mm}</math>)</b>					
Cultivo	8,0 a	6,0 a	6,6 a	3,4 a	5,1 a	5,2 a
Pasto	5,9 a	5,6 a	7,8 a	3,2 a	8,3 a	5,9 a
Páramo	9,4 a	4,3 a	4,9 a	6,4 a	6,4 a	10,4 a

(>0,5mm)=agregados estables, (<0,5mm)=agregados inestables. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas por uso de suelo y profundidad de muestreo ( $p < 0.05$ ).

Se encontró una correlación positiva ( $r=0,075$ ) pero no significativa ( $p=0,592$ ) entre la tasa de almacenamiento de COS y los agregados estables del suelo, es decir que, a mayor almacenamiento de COS, mayor estabilidad del suelo (Figura 18). Esto coincide con lo reportado por Rhoton [246], Chaney & Swift [247] y Wright & Hons [248]. Fortum & Fortum [249], quienes asocian la concentración de MOS con la estabilidad de agregados debido a su efecto cementante que promueve mayor cohesión y disminuye el efecto de estallido y la permeabilidad de agregados. Los contenidos de MOS por si solos, no son responsables de la cantidad de agregados y su estabilidad, en este sentido, influye en mayor medida, la calidad de MO y su grado de descomposición con respecto a las partículas minerales en el suelo [250]. Los resultados encontrados para estabilidad estructural son consistentes con la densidad aparente en los usos de suelo evaluados, en los cuales no se encontró diferencias estadísticamente significativas (ver capítulo 2).



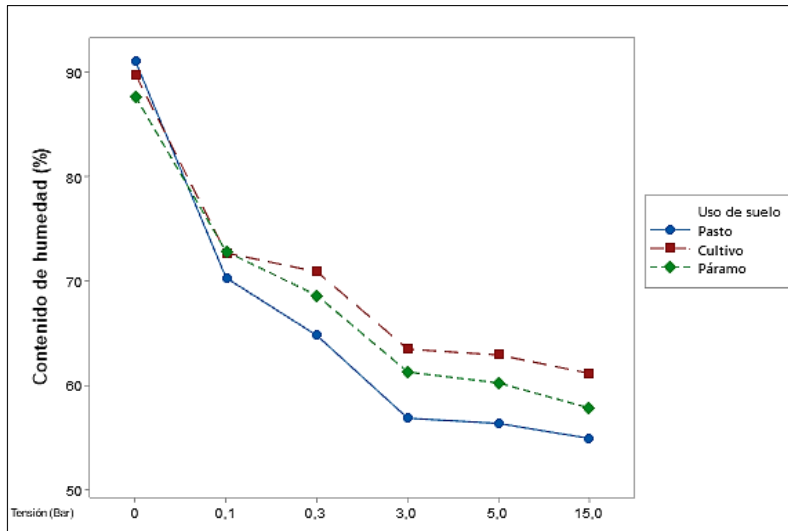
**Figura 18.** Relación entre agregados estables y almacenamiento de COS

### 4.3.3 Retención de humedad en el suelo

El almacenamiento de agua en el suelo ha sido descrito por varios autores [251][252][253][254] a través de la curva de retención de humedad (CRH), la cual expone la relación entre el contenido de agua y el potencial de retención. Dicha curva permite conocer los límites de capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y agua disponible (AD) para la planta.

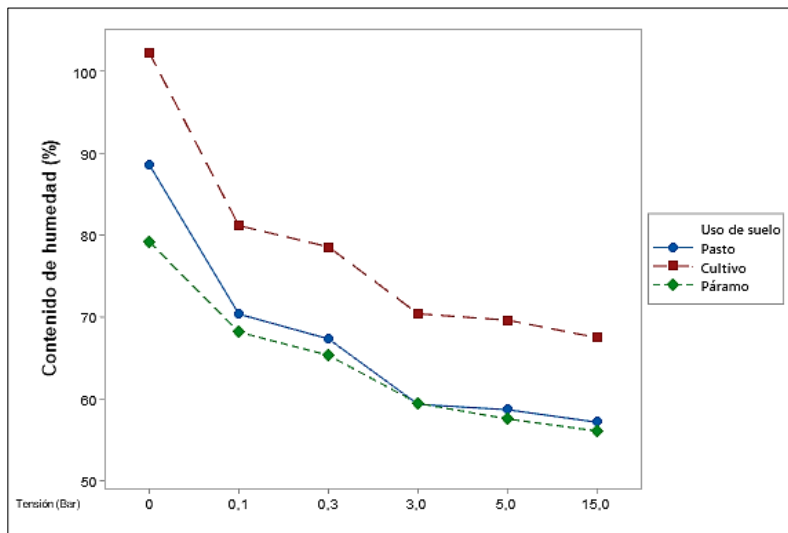
La CRH bajo los tres usos de suelo estudiados a una profundidad de 0 a 30 cm se presentan en las figuras Figura 19Figura 20Figura 21. Los datos muestran que el contenido de humedad del suelo a punto de saturación (PS) entre 0-5 cm de profundidad no fueron estadísticamente diferentes (Figura 19), siendo el suelo bajo condición de pasto kikuyo el que almacena mayor porcentaje de humedad (91%), seguido de cultivo de papa (90%) y páramo (88%). El contenido de humedad a CC disminuye drásticamente para pasto kikuyo

a 65%, cultivo de papa 71% y páramo 69%. El porcentaje de humedad a PMP es superior en cultivo de papa (61%), respecto a páramo (58%) y pasto kikuyo (55%).



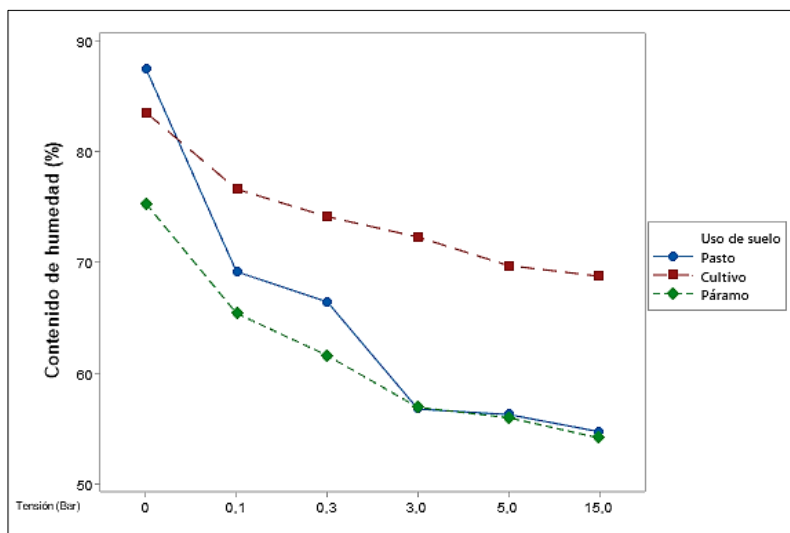
**Figura 19.** Curva de retención de humedad por uso de suelo a 0-5 cm de profundidad.

A una profundidad de 5-15cm (Figura 20) se encontraron diferencias significativas para PS en los tres usos de suelo estudiados. El suelo cultivado con papa muestra un mayor porcentaje de humedad (102%), seguido de pasto kikuyo (88%) y páramo (79%), esta misma tendencia se mantiene para CC y PMP, sin ser estadísticamente diferente. El suelo bajo condición de pasto kikuyo y páramo presentan porcentajes similares de humedad a CC (67%-65%) y a PMP (57 y 56%).



**Figura 20.** Curva de retención de humedad por uso de suelo a 5-15 cm de profundidad

Se encontró diferencias significativas a PS por uso de suelo entre 15-30cm de profundidad (Figura 21), el porcentaje de humedad varió entre 88% en suelos bajo pasto kikuyo, 84% en suelos bajo cultivo de papa, y 75% en páramo. Las condiciones de suelo a CC no difieren estadísticamente para los diferentes usos del suelo estudiados, cuyo porcentaje es superior en el suelo cultivado con papa (74%), seguido de pasto kikuyo (66%) y páramo (62%). Para PMP, el suelo cultivado alcanza un contenido de humedad de 69%, seguido de pasto kikuyo (55%) y páramo (54%), sin ser estadísticamente diferentes.



**Figura 21.** Curva de retención de humedad por uso de suelo a 15-30 cm de profundidad

En términos generales, el suelo cultivado presentó un porcentaje de retención de humedad a CC ligeramente superior a suelos bajo condición de páramo y pasto kikuyo, como resultado del aumento de la microporosidad y una mejor aireación del suelo asociada a las actividades de arado del suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Patiño et al., [255], quienes encontraron mayores valores de humedad a CC en suelos cultivados respecto a suelos bajo cobertura vegetal natural.

Los altos porcentajes de humedad a CC y PMP (>50%) en todas los usos de uso de suelo y profundidades evaluadas, coincide con lo expuesto por Hincapié & Tobón [256], Henao et al.,[257] Van Ranst et al.,[258] y Salcedo et al.,[259] en andisoles de Colombia, Indonesia y México respectivamente. Este comportamiento está relacionado con la presencia de complejos órgano minerales característicos de los andisoles, los cuales se caracterizan por presentar un alto porcentaje de agregados estables, baja densidad aparente y alto contenido de materia orgánica, lo que minimiza la escorrentía superficial y mejora el drenaje interno del suelo [227][219].

Según Meza & Geissert [219], la distribución de agua a bajas tensiones (0 a 3 bar), está influenciada principalmente por la distribución de agregados, lo que explicaría el alto

contenido de humedad en los tres condiciones de suelo estudiadas, mientras que a altas succiones (15 bar), la RH se ve afectada por la textura del suelo.

Los valores para contenido de agua disponible se observan en la Tabla 24. A una profundidad de 0-5 cm, el suelo bajo condición de páramo presentó mayor contenido de agua disponible (AD) (10,8%), seguido de pasto kikuyo (9,9%) y cultivo de papa (9,7%). A medida que se profundiza en el perfil, el AD en el suelo bajo condición de páramo disminuyó 1,5% y 1,9% entre 5-15 cm y 15-30 cm respectivamente, mientras que en el suelo bajo pasto kikuyo incrementó 0,3% a 5-15 cm y 1,5% a 15-30 cm. Finalmente se observó un incremento de 1,4% de AD a una profundidad de 0-5 cm y un decrecimiento de 0,2% a 15-30 cm bajo el suelo cultivado con papa.

**Tabla 24.** Agua disponible por uso de suelo y profundidad de muestreo

<b>Profundidad (cm)</b>	0-5	5-15	15-30
<b>Uso de suelo</b>	<b>AD (%)</b>		
Cultivo de papa	9,7 a	11,1 a	10,9 a
Pasto kikuyo	9,9 a	10,2 a	11,7 a
Páramo	10,8 a	9,3 a	7,4 a

AD: agua disponible. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas por uso de suelo y profundidad de muestreo ( $p < 0.05$ )

El AD promedio en suelos bajo condición de páramo disminuyó 2% en comparación al suelo cultivado con papa y pasto kikuyo. Los valores encontrados en esta investigación, están dentro del rango reportado por Hansen & Israelsen [260] y La Manna et al., [261] en andisoles con clase textural franco y franco arenoso (7%-15%). En ningún uso de suelo evaluado se encontraron diferencias estadísticas significativas, lo que permite inferir que la retención de humedad del suelo no ha sido afectada por el desarrollo de actividades antrópicas en el humedal.

Los coeficientes de correlación de CO, Da y textura, con respecto a la CC y PMP en los usos de suelo estudiados en el humedal Laguna de la Cocha, se presentan en la Tabla 25. No se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las variables estudiadas, a excepción de CO y PMP. La relación entre CO y la retención de humedad ha sido estudiada por varios autores [262][263][264][265]. Sin embargo, aún no existe un consenso claro al respecto. Dichos autores reportan correlaciones directas entre COS y CC y PMP, argumentando que una disminución en el COS influiría en la degradación de agregados del suelo e incrementaría procesos de erosión del suelo [200].

Lo encontrado en este estudio es opuesto a lo citado por estos autores, debido a que el porcentaje de agregación de los usos de suelo estudiados es alto; adicionalmente la correlación inversa encontrada en esta investigación es el resultado del alto contenido de carbono orgánico, a diferencia de las investigaciones mencionadas anteriormente, en las cuales el porcentaje de CO no supera el 5%. Por su parte, Huntington [266] menciona que

el contenido de COS es relevante a PMP, mientras que no lo es a CC, lo que coincide con la diferencia significativa reportada en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Coeficientes de correlación entre retención de humedad a CC y PMP y CO, Da, A, L y Ar.

Variable	Relación de humedad a capacidad de campo	Relación de humedad a punto de marchitez permanente
Carbono orgánico	-0,266	-0,383 **
Densidad aparente	-0,029	-0,178
Arena	-0,160	-0,215
Limo	0,125	0,146
Arcilla	0,217	0,322

\*\*Diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ )

Con respecto a las relaciones encontradas entre CC, PMP y porcentaje de arena, podría deberse a las bajas cargas superficiales de la arena [267], además de la relación directa encontrada por varios autores entre infiltración y percolación de agua en suelos arenosos [268][269]. Las arenas presentan alta macroporosidad y permeabilidad, generando una disminución en la retención de humedad del suelo [270]. Esta correlación resulta significativa cuando el suelo presenta fracciones dominantes de arena, como ocurre frecuentemente en clase texturales franco arenosa y en ocasiones en franco [271].

El limo y arcilla presentaron relaciones positivas, con CC y PMP. Los limos, por su parte, tienen una estabilidad baja y permeabilidad de media a baja, mientras que las arcillas, por lo general, presentan una retención de humedad alta como respuesta a la baja permeabilidad y microporosidad elevada [272]. Finalmente, la relación encontrada entre Da y CC y PMP, podría deberse a que a medida que la Da baja, existe mayor porosidad del suelo, por lo que el agua es retenida en el suelo con más fuerza [273].

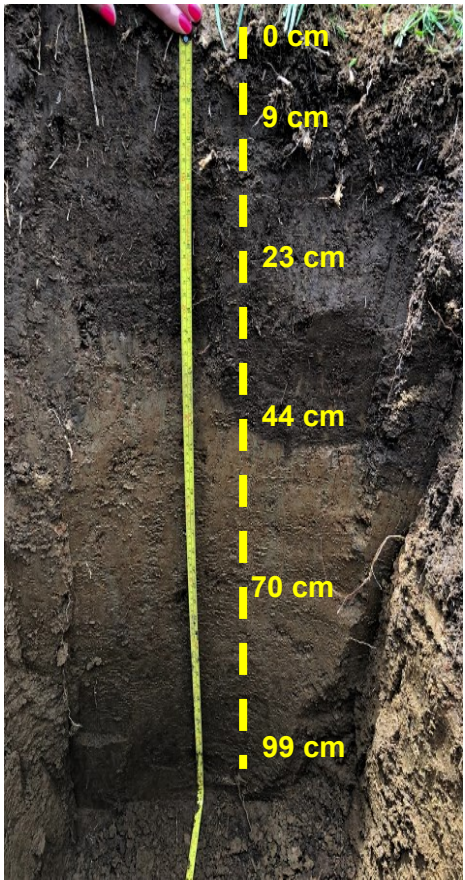
## 4.4 Conclusiones

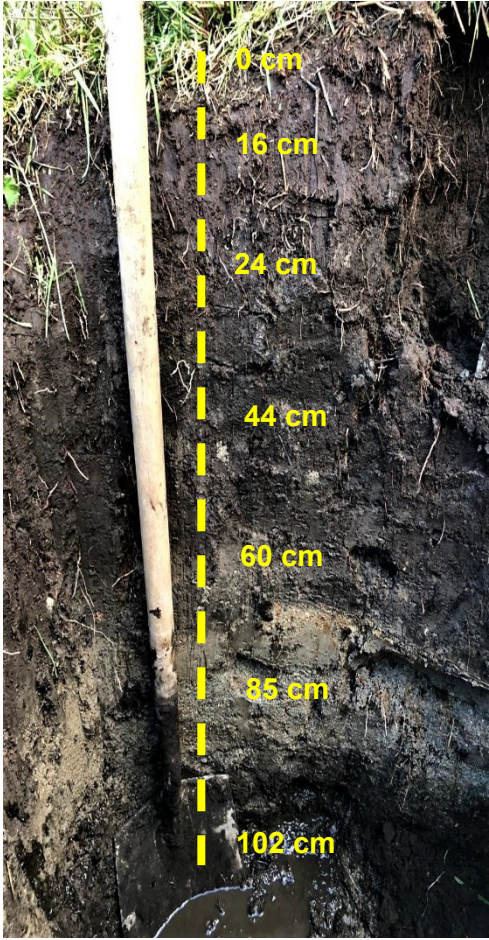
La relación de estratificación del COS fue inferior a 2 en todos los usos de suelo estudiados hasta 30 cm de profundidad, esta respuesta se asocia a la alta tasa de almacenamiento de carbono orgánico.

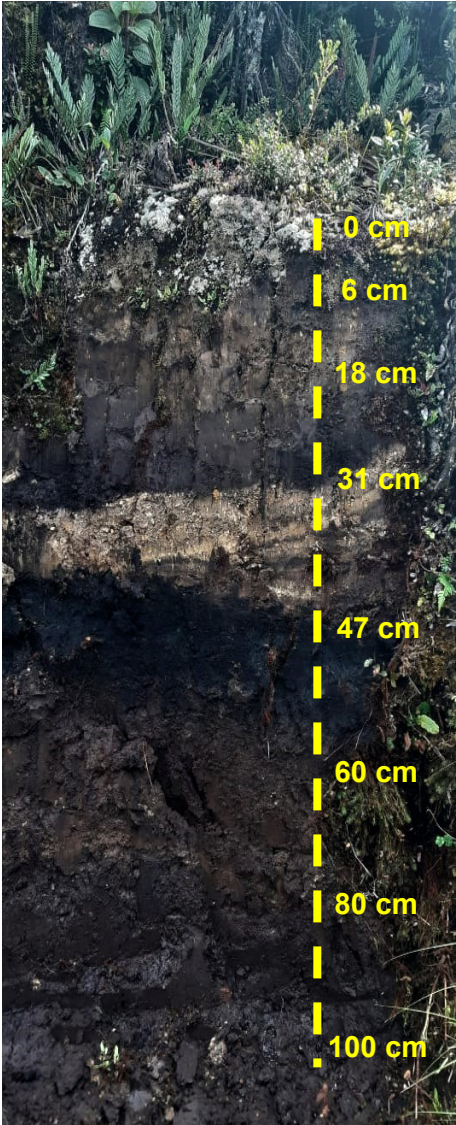
Los agregados estables ( $>0,5\text{mm}$ ) predominan en todos los usos de suelo evaluados, y su estabilidad está relacionada con la capacidad de almacenamiento de COS. Los usos de suelo no mostraron una influencia directa sobre la estabilidad estructural de los agregados del suelo, lo que permite inferir que los suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas en el humedal Laguna de la Cocha, son muy estables.

El contenido de humedad en todos los usos de suelo evaluados en el humedal Laguna de la Cocha, no son influenciados por las actividades antrópicas, y su comportamiento es inverso a la densidad aparente, almacenamiento de COS y porcentaje de arena en el suelo.

## A. Anexo: Descripción de perfiles de suelo

Perfil tipo	Imagen	Características	Descripción
Cultivo de papa	 <p>The image shows a soil profile with a yellow measuring tape on the left side. Dashed yellow lines indicate depths of 0 cm, 9 cm, 23 cm, 44 cm, 70 cm, and 99 cm. The soil is dark brown and appears to be a volcanic ash soil.</p>	<p>Localizado en el departamento de Nariño, municipio de Pasto, corregimiento El Encano, vereda El Motilón.</p> <p>Coordenadas geográficas: 1°7'35" N 77°10'30" O</p> <p>Paisaje: Montaña</p> <p>Altitud: 2815 msnm</p> <p>Material parental: Cenizas volcánicas.</p> <p>Clima ambiental: Frío</p> <p>Nivel freático: No</p> <p>Inundaciones: No</p> <p>Uso actual: Cultivo de papa</p>	<p>Perfil de suelo con 99 cm de profundidad y 5 horizontes. En los horizontes 1 (0-9cm) y 2 (9-23cm) se observan bloques subangulares de tamaño medio, en 3 (23-44cm), 4 (44-70cm) y 5 (70-99cm) bloques angulares medios en los dos primeros y finos en el último.</p> <p>Su consistencia en húmedo es firme en el horizonte 1, muy firme en 3,4 y 5 y friable en 2. En saturado es ligeramente adhesivo en el horizonte 1, adhesivo en 2 y muy adhesivo en 3,4 y 5.</p> <p>En los horizontes 1 y 2 la clase textural es franco arcilloso, y en 3,4 y 5 franco arcilloso.</p> <p>Abundancia de raíces de tamaño medio en el horizonte 1, finas y abundantes en 2, y finas y escasas en 3,4 y 5.</p>

Perfil tipo	Imagen	Características	Descripción
<p>Pasto kikuyo</p>		<p>Localizado en el departamento de Nariño, municipio de Pasto, corregimiento El Encano, vereda El Motilón.</p> <p>Coordenadas geográficas: 1°7'42" N 77°10'30" O</p> <p>Paisaje: Montaña</p> <p>Altitud: 2792 msnm</p> <p>Material parental: Cenizas volcánicas.</p> <p>Clima ambiental: Frío</p> <p>Nivel freático: Sí</p> <p>Inundaciones: No</p> <p>Uso actual: pasto kikuyo</p>	<p>Perfil de suelo con 102 cm de profundidad y 6 horizontes. En los horizontes 1 (0-16cm), 2 (16-24cm), 3 (44-60 cm) y 5 (60-85 cm) se observa estructura con bloques subangulares de tamaño grande, medio y fino en los dos últimos. En los horizontes 3 (24-44cm) y 6 (85-102 cm) predominan los bloques angulares de tamaño medio.</p> <p>Su consistencia en húmedo es firme en los horizontes 1,2,3,4 y 6, y muy firme en el horizonte 5. En saturado, su consistencia es ligeramente plástica para los horizontes 1,2 y 6, plástica en 3 y 4 y no plástica en 5.</p> <p>Predomina la clase textural franco limoso en horizontes 3, 6 y 7, franco limoso en 1 y 2, limoso en 4 y franco en 5.</p> <p>En el primer horizonte, se observan raíces abundantes de tamaño medio, en el 2 y 3, se mantienen su tamaño, pero son escasas, y en el 4, 5 y 6 son finas y escasas.</p>

Perfil tipo	Imagen	Características	Descripción
Páramo	 <p>A photograph of a soil profile with a vertical scale on the right side. The scale is marked with yellow dashed lines and labels: 0 cm, 6 cm, 18 cm, 31 cm, 47 cm, 60 cm, 80 cm, and 100 cm. The soil shows distinct horizons with varying textures and colors, from dark brown at the top to very dark, almost black at the bottom.</p>	<p>Localizado en el departamento de Nariño, municipio de Pasto, corregimiento El Encano, páramo Bordoncillo.</p> <p>Coordenadas geográficas: 1°8'37" N 77°5'52" O</p> <p>Paisaje: Montaña</p> <p>Altitud: 3219 msnm</p> <p>Material parental: Cenizas volcánicas.</p> <p>Clima ambiental: Muy frío</p> <p>Nivel freático: No</p> <p>Inundaciones: No</p> <p>Uso actual: sin uso, cobertura vegetal natural.</p>	<p>Perfil de suelo con más de 100 cm de profundidad y 7 horizontes. Estructura con bloques subangulares de tamaño medio en horizonte 1 (0-6 cm), 6 (60-80 cm) y 7 (80-100 cm), grandes en 2 (6-18 cm) y 4 (31-47 cm); bloques angulares de tamaño grande en 3 (18-31 cm) y 5 (47-60 cm).</p> <p>La consistencia es húmeda para los horizontes 1, 2, 3 y 5, muy firme y 4, 6 y 7 firme. En saturado, predomina la consistencia ligeramente plástica en los horizontes 3, 4, 5, 6 y 7, muy plástica en 1 y plástica en 2.</p> <p>Las clases texturales se dividen en franco arcilloso en 1 y 2, franco limoso en 3, 6 y 7, limoso en 4 y franco en 5.</p> <p>Raíces de tamaño medio y abundantes en los horizontes 1, 2 y 6, medias y escasas en 3, 4, y 5 y medias-finas y escasas en 7.</p>

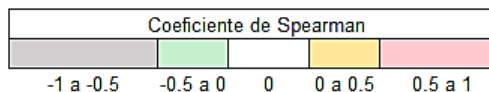
## B. Anexo: Correlaciones entre COS y propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

### 1. Correlación por uso de suelo

#### Uso de suelo: Pasto

Parámetro	COS																	
COS	1	pH A																
pH A	-0,494	1	pH K															
pH K	-0,205	0,241	1	CE														
CE	0,602	0,115	-0,176	1	P													
P	0,368	-0,258	-0,560	0,672	1	N												
N	0,912	-0,348	-0,252	0,582	0,247	1	MO											
MO	0,996	-0,527	-0,167	0,587	0,361	0,908	1	Dr										
Dr	-0,485	0,017	0,453	-0,371	-0,298	-0,583	-0,479	1	PT									
PT	0,485	-0,200	0,400	-0,447	0,238	0,283	0,479	0,017	1	A								
A	-0,767	0,193	-0,193	-0,560	-0,188	-0,685	-0,744	0,105	-0,791	1	L							
L	0,596	-0,095	0,000	0,370	0,093	0,639	0,552	-0,274	0,639	-0,866	1	Ar						
Ar	0,767	-0,193	0,193	0,560	0,188	0,685	0,744	-0,105	0,791	-1,000	0,866	1						

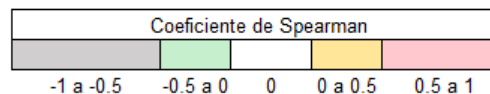
**Correlación significativa  $p < 0.05$**



#### Uso de suelo: Cultivo

Parámetro	COS																	
COS	1	pH A																
pH A	0,000	1	pH K															
pH K	-0,084	0,851	1	CE														
CE	0,402	-0,060	-0,487	1	P													
P	0,653	0,000	0,168	-0,038	1	N												
N	0,283	0,170	0,444	-0,259	0,770	1	MO											
MO	1,000	0,000	-0,084	0,402	0,653	0,283	1	Dr										
Dr	-0,489	-0,464	-0,195	-0,335	0,169	0,321	-0,489	1	PT									
PT	0,283	-0,407	-0,368	0,469	0,418	0,267	0,283	-0,405	1	A								
A	0,264	0,536	0,529	0,079	0,212	0,632	0,264	-0,267	-0,053	1	L							
L	-0,264	-0,536	-0,529	-0,079	-0,212	-0,632	-0,254	0,267	0,053	-1,000	1	Ar						
Ar	-0,639	-0,464	-0,413	-0,275	-0,504	-0,639	-0,639	0,462	-0,091	-0,866	0,866	1						

**Correlación significativa  $p < 0.05$**



## Uso de suelo: Páramo

Parámetro	COS																	
COS	1	pH A																
pH A	-0,017	1	pH K															
pH K	-0,070	0,537	1	CE														
CE	0,025	-0,292	-0,306	1	P													
P	0,151	-0,277	-0,057	0,458	1	N												
N	-0,400	0,079	-0,393	0,329	-0,351	1	MO											
MO	1,000	-0,017	-0,070	0,025	0,151	-0,400	1	Dr										
Dr	0,117	0,184	0,437	0,152	0,669	-0,717	0,117	1	PT									
PT	0,717	0,201	0,254	0,481	0,059	0,500	-0,717	0,083	1	A								
A	-0,738	-0,249	-0,359	0,240	0,053	0,422	-0,738	-0,158	0,580	1	L							
L	0,738	0,249	0,359	-0,240	-0,053	-0,422	0,738	0,158	-0,580	-1,000	1	Ar						
Ar	0,685	-0,249	-0,194	-0,240	-0,026	-0,369	0,685	-0,158	-0,843	-0,500	0,500	1						

Coeficiente de Spearman				
-1 a -0,5	-0,5 a 0	0	0 a 0,5	0,5 a 1

**Correlación significativa p<0,05**

COS: carbono orgánico del suelo  
 pH A: pH Agua  
 pH K: pH KCl  
 CE: conductividad eléctrica  
 P: fósforo disponible  
 N: nitrógeno  
 MO: materia orgánica

PT: porosidad total  
 A: arena  
 L: limo  
 Ar: arcilla  
 Dr: densidad real

## 2. Correlación por profundidad de muestreo

**Profundidad: 0-5cm**

Parámetro	COS																		
COS	1	pH A																	
pH A	0,145	1	pH KCl																
pH KCl	0,092	0,616	1	CE															
CE	-0,783	-0,547	-0,487	1	P														
P	-0,300	-0,427	-0,311	0,217	1	N													
N	-0,778	-0,438	0,030	0,669	0,393	1	MO												
MO	1,000	0,145	0,092	-0,783	-0,300	-0,778	1	PT											
PT	0,750	-0,137	-0,109	-0,417	-0,433	-0,418	0,750	1	A										
A	0,474	0,406	-0,080	-0,632	0,316	-0,556	0,474	0,105	1	L									
L	-0,474	-0,406	0,080	0,632	-0,316	0,556	-0,474	-0,105	-1,000	1	Ar								
Ar	-0,474	-0,406	0,080	0,632	-0,316	0,556	-0,474	-0,105	-1,000	1,000	1	Dr							
Dr	0,733	0,291	0,134	-0,667	-0,067	-0,594	0,733	0,333	0,685	-0,685	-0,685	1	RB						
RB	-0,533	-0,325	0,303	0,400	-0,100	0,661	-0,533	-0,250	-0,843	0,843	0,843	-0,667	1	CBM					
CBM	0,733	0,282	0,193	-0,750	-0,567	-0,661	0,733	0,550	0,264	-0,264	-0,264	0,533	-0,167	1	NBM				
NBM	0,667	0,256	0,109	-0,733	0,133	-0,377	0,667	0,433	0,791	-0,791	-0,791	0,767	-0,650	0,467	1				

Coeficiente de Spearman				
-1 a -0,5	-0,5 a 0	0	0 a 0,5	0,5 a 1

**Correlación significativa p<0,05**

**Profundidad: 5-15 cm**

Parámetro	COS																	
COS	1	pH A																
pH A	0,187	1	pH KCl															
pH KCl	0,017	0,651	1	CE														
CE	<b>-0,669</b>	-0,628	-0,445	1	P													
P	-0,050	<b>-0,738</b>	-0,562	0,405	1	N												
N	-0,467	-0,255	-0,042	<b>-0,695</b>	0,034	1	MO											
MO	<b>1,000</b>	0,187	0,017	<b>-0,669</b>	-0,050	-0,467	1	PT										
PT	0,150	0,502	0,599	<b>-0,285</b>	-0,101	-0,317	0,150	1	A									
A	<b>0,791</b>	0,619	0,427	<b>-0,953</b>	-0,345	<b>-0,685</b>	<b>0,791</b>	0,369	1	L								
L	<b>-0,822</b>	-0,233	-0,046	<b>0,825</b>	-0,092	<b>0,822</b>	<b>-0,822</b>	-0,274	<b>-0,866</b>	1	Ar							
Ar	<b>-0,781</b>	0,619	-0,427	<b>0,953</b>	0,345	<b>0,685</b>	<b>-0,791</b>	-0,369	-1,000	<b>0,866</b>	1	Dr						
Dr	0,017	0,051	0,203	-0,410	0,328	<b>-0,717</b>	0,017	0,400	0,369	-0,548	-0,369	1						

**Coeficiente de Spearman**

-1 a -0,5	-0,5 a 0	0	0 a 0,5	0,5 a 1
-----------	----------	---	---------	---------

**Correlación significativa p<0,05**

**Profundidad: 15-30 cm**

Parámetro	COS																	
COS	1	pH A																
pH A	0,203	1	pH KCl															
pH KCl	-0,145	0,623	1	CE														
CE	-0,368	-0,034	-0,081	1	P													
P	-0,100	<b>-0,255</b>	-0,654	-0,286	1	N												
N	<b>-0,700</b>	-0,492	-0,368	<b>0,519</b>	0,092	1	MO											
MO	<b>1,000</b>	0,203	-0,145	<b>-0,368</b>	-0,100	-0,700	1	PT										
PT	<b>0,817</b>	-0,136	-0,434	<b>-0,268</b>	0,259	-0,633	0,817	1	A									
A	0,949	0,268	0,000	<b>-0,582</b>	-0,026	<b>-0,843</b>	<b>0,949</b>	0,791	1	L								
L	-0,474	-0,054	0,323	<b>0,370</b>	-0,582	<b>0,422</b>	<b>-0,474</b>	-0,632	<b>-0,500</b>	1	Ar							
Ar	<b>-0,949</b>	-0,268	0,000	<b>0,582</b>	0,026	<b>0,843</b>	<b>-0,949</b>	-0,791	-1,000	<b>0,500</b>	1	Dr						
Dr	0,200	-0,288	-0,272	-0,762	0,611	<b>-0,400</b>	0,200	0,467	0,369	-0,580	-0,369	1						

**Coeficiente de Spearman**

-1 a -0,5	-0,5 a 0	0	0 a 0,5	0,5 a 1
-----------	----------	---	---------	---------

**Correlación significativa p<0,05**

- COS: carbono orgánico del suelo
- pH A: pH Agua
- pH K: pH KCl
- CE: conductividad eléctrica
- P: fósforo disponible
- N: nitrógeno
- MO: materia orgánica
- PT: porosidad total
- A: arena
- L: limo
- Ar: arcilla
- Dr: densidad real
- RB: respiración basal
- CBM: carbono biomasa microbiana
- NBM: nitrógeno biomasa microbiana

## Referencias

- [1] C. Canedoli, C. Ferrè, D. Abu El Khair, R. Comolli, C.Liga, F.Mazzucchelli, A.Proietto, N.Rota, G. Colombo, B. Bassano, R. Viterbi, E. Padoa-schioppa. "Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands," *Ecosyst. Serv.*, vol. 44, no. June, p. 101135, 2020,
- [2] J. Dumanski, "Carbon sequestration, soil conservation and the Kyoto protocol: summary of implications," *Clim. Chang.*, vol. 65, pp. 255–261, 2004.
- [3] J. Thompson, L. Zurita, F. Müller, S. Chimbolema, and E. Suárez, "Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage," *Arctic, Antart. Alp. Reserarch*, vol. 53, pp. 48–59, 2021.
- [4] O. Zúñiga, E. Peña, A. Torres, R. Cuero, and J. Peña, "Assessment of the impact of anthropic activities on carbon storage in soils of high montane ecosystems in Colombia," *Agron. Colomb.*, vol. 31, no. 1, pp. 112–119, 2013.
- [5] A. Carvajal, A. Feijoo, H. Quintero, and M. Rondón, "Soil Organic Carbon in Different Land Uses of Colombian Andean Landscapes," *Soil. Sci. Plant Nutr*, vol. 9, pp. 222–235, 2009.
- [6] M. Rubio, C. Rubio, M. Salomón, and E. Abraham, "Conservation of ecosystem services in high-altitude Andean wetlands: Social participation in the creation of a natural protected area," *Ecol. Austral*, vol. 27, pp. 177–192, 2017.
- [7] A. Ward, P. Dargusch, G. Grussu, and R. Romeo, "Using carbon finance to support climate policy objectives in high mountain ecosystems," *Clim. Policy*, vol. 16, pp. 732–751, 2016.
- [8] Gobernación de Nariño, "Plan departamental de extensión agropecuaria del departamento de Nariño." p. 222, 2019.
- [9] United States Department of Agriculture, "Keys to Soil Taxonomy." p. 410, 2014.
- [10] I. Kögel-Knabner and W. Amelung, *Dynamics, Chemistry, and Preservation of Organic Matter in Soils*, vol. 12. Elsevier, 2014.
- [11] M. Johnson, "The role of soil management in sequestering soil carbon," in *Soil management and green house effect*, R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. Stewart, Eds. 1995, pp. 351–363.

- [12] K. Haider and G. Guggenberger, "ORGANIC MATTER /Genesis and Formation," *Encyclopedia of Soils in the Environment*. pp. 93–101, 2005.
- [13] A. Gelaw, B. Singh, and R. Lal, "Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 188, pp. 256–263, 2014.
- [14] A. Ferreira, L. Leite, A. de Araújo, and N. Eisenhauer, "Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of northeast Brazil," *L. Degrad. Dev.*, vol. 27, pp. 171–178, 2014.
- [15] H. Fassbender and E. Bornemisza, *Química De Suelos: Con Énfasis en Suelos de América Latina*. San José, 1994.
- [16] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. FAO, *Status of the World's Soil Resources*. Rome, Italy, 2015.
- [17] N. Batjes and W. Sombroek, "Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 3, pp. 161–173, 1997.
- [18] S. Aguilera, "Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos." pp. 77–85, 2000.
- [19] K. Ismail-Meyer, M. Stolt, and D. Lindbo, "Soil Organic Matter," in *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Elsevier B.V., 2018, pp. 471–512.
- [20] E. Zagal, N. Vidal, and A. Flores, "La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios en la materia orgánica labil," *Agric, Téc*, vol. 62, pp. 284–296, 2002.
- [21] J. Montoya, J. Menjivar, and I. Bravo, "Fraccionamiento y cuantificación de la materia orgánica en andisoles bajo diferentes sistemas de producción," *Acta Agron.*, vol. 62, pp. 333–343, 2013.
- [22] R. Hofstede, "The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient," *Plant Soil*, vol. 173, pp. 111–132, 1995.
- [23] J. Gallardo, M. González, and C. Pérez, "La materia orgánica del suelo: su importancia en suelos naturales y cultivados." p. 239, 1992.
- [24] L. Morris, "Soil organic matter forms and functions," *Encyclopedia of Forest Sciences*. pp. 1201–1207, 2004.
- [25] G. Góez, R. Zapata, and J. González, "Variación de la concentración del furadpan en el perfil de un andisol," *Rev. Fac. Ing.*, vol. 19, pp. 14–23, 1999.
- [26] G. Guggenberger, B. Christensen, and W. Zech, "Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 45, pp. 449–458, 1994.
- [27] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación FAO, *Carbono orgánico del suelo el potencial oculto*. Roma, Italia, 2017.

- [28] R. Lal, R. Follett, B. Stewart, and J. Kimble, "Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security," *Soil Sci.*, vol. 172, pp. 943–956, 2007.
- [29] H. Eswaran, E. Van Den Berg, and P. Reich, "Organic Carbon in Soils of the World," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, pp. 192–194, 1993.
- [30] M. Aguilar, M. Alfaro, B. Martin, D. Ponce De León, and L. Font, "Carbono Lábil Como Un Indicador De Cambios En Dos Suelos Bajo Diferentes Usos," *Cultiv. Trop.*, vol. 36, pp. 64–70, 2015.
- [31] J. Johnson, A. Franzluebbers, S. Weyers, and D. Reicosky, "Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions," *Environ. Pollut.*, vol. 150, pp. 107–124, 2007.
- [32] Eswaran, E. Van Der Berg, and P. Reich, "Organic Carbon in Soils of the World.," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, pp. 192–194, 1993.
- [33] R. Dahlgren, M. Nanzoyo, and M. Saigusa, "Volcanic soils: an overview and new perspectives." pp. 1–130, 2004.
- [34] S. Shoji, R. Dahlgren, and M. Nanzoyo, "Terminology, Concepts and Geographic Distribution of Volcanic Ash Soils," in *Developments in Soil Science*, vol. 21, 1993, pp. 1–5.
- [35] S. Hasiotis, M. Kraus, and T. Demko, "Climatic Controls on Continental Trace Fossils," in *Trace Fossils*, Elsevier B.V., 2007, pp. 172–195.
- [36] N. Van Breemen and P. Buurman, *Soil Formation*. Springer, Dordrecht, 1998.
- [37] A. Arias *et al.*, "Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales," Bogotá, 2018.
- [38] M. Roa and S. Brown, "Caracterización de la acumulación de Carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río barbas (Quindío, Colombia)," *Caldasía*, vol. 38, no. 1, pp. 117–135, 2016.
- [39] A. Arias Monsalve, A. Chávez, C. Fernández, D. Querubin, I. Arias, J. Gutierrez, J. Molina, L. Camacho, L. Robayo, R. Hernadez, S. Caguasango, Y. Moreno, C. Camacho. "Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales," *Repos. Inst. Doc. Científica Humboldt*, 2018, Accessed: Jan. 25, 2020.
- [40] Ramsar, "Estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos," Kampala, Uganda, 2008.
- [41] Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, *Colombia Anfibia. Un país de humedales*. Bogotá, 2015.
- [42] R. Groot, M. Wilson, and R. Boumans, "A typology for the classification , description and valuation of ecosystem functions , goods and services," *Ecol. Econ.*, vol. 41, pp.

- 393–408, 2002.
- [43] K. Sahrawat, "Organic matter accumulation in submerged soils.," *Adv. Agron.*, pp. 169–201, 2003.
- [44] A. Nahlik and M. Fennessy, "Carbon storage in US wetlands," *Nat. Commun.*, vol. 7, pp. 1–9, 2016.
- [45] D. Suárez, C. Acurio, S. Chimbolema, and X. Aguirre, "Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador," *Ecol. Apl.*, vol. 15, no. 2, pp. 171–177, 2016.
- [46] M. Roa and S. Brown, "Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños Humedales Andinos en la cuenca alta del Río Barbas (Quindío, Colombia)," *Caldasia*, vol. 38, pp. 117–136, 2016.
- [47] W. Buytaert *et al.*, "Human impact on the hydrology of the Andean páramos," *Earth-Science Rev.*, vol. 79, pp. 53–72, 2006.
- [48] J. Rangel, *Colombia, diversidad biótica III: La región de vida paramuna*. Bogotá, 2000.
- [49] R. Hofstede, P. Segarra, and V. Mena, *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Quito, 2003.
- [50] L. Garavito, "The paramos in Colombia , an ecosystem at risk," *INGENIARE*, vol. 19, pp. 127–136, 2015.
- [51] M. Lis, Y. Rubiano, and J. Loaiza, "Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena," *Acta Univ. Carolinae, Geogr.*, vol. 54, pp. 15–23, 2019.
- [52] K. Africano, G. Cely, and P. Serrano, "Potential CO<sub>2</sub> Capture Associated with Edaphic Component in Moorlands Guantiva-La Rusia, Department of Boyacá, Colombia," *Perspect. geográfica*, vol. 21, no. 1, pp. 91–110, 2016.
- [53] W. Buytaert, G. Wyseure, B. De Bièvre, and J. Deckers, "The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 20, pp. 3985–3997, 2005.
- [54] Ministerio del Medio Ambiente, "Ficha informativa de los humedales de RAMSAR," 2000.
- [55] Corponariño, *Plan de Manejo Ambiental Integral Humedal Ramsar Laguna de la Cocha*. San Juan de Pasto, 2011.
- [56] Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, W. Colombia, and ADC, "Proyecto de Incentivos para la Laguna de la Cocha como sitio Ramsar." pp. 1–89, 2004.
- [57] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales DEAM, *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, 2015.
- [58] Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt,

- “Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos La Cocha- Patascoy a escala 1:25.000.” Bogotá, pp. 1–164, 2017.
- [59] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Mapa de ecosistemas de Colombia.” 2007.
- [60] R. Domínguez, A. Tobías, S. Ruiz, P. Salvador, A. Arrieta, A. Galindo, R. Sánchez. “Almacenamiento de carbono y agua en un área periurbana de Tabasco,” *Terra Latinoam.*, vol. 37, pp. 197–208, 2019.
- [61] V. Stolbovoy, L. Montanarella, N. Filippi, A. Jones, J. Gallego, and G. Grassi, “Soil Sampling Protocol to Certify the Changes of Organic Carbon Stock in Mineral Soils of European Union.” pp. 1–13, 2007.
- [62] R. Grossman, D. Harms, D. Kingsbury, R. Shaw, A. Jenkins, and R. Lal, “Assessment Methods for Soil Carbon using the US soil survey,” in *Assessment methods for soil carbon*, Florida, 2000, pp. 87–104.
- [63] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).” 1997.
- [64] J. Rodríguez, J. Fuentes, J. Gabriel, C. Gutierrez, N. Nanos, M. Escuer, R. Boluda “Catena Soil organic carbon stock on the Majorca Island : Temporal change in agricultural soil over the last 10 years,” *Catena*, vol. 181, p. 104087, 2019.
- [65] J. Leifeld, S. Bassin, and J. Fuhrer, “Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use , soil characteristics , and altitude,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 105, pp. 255–266, 2005.
- [66] R. Twongyirwe, D. Sheil, J. Majaliwa, P. Ebanyat, M. Tenywa, M. Van Heist, L. Kumar “Variability of Soil Organic Carbon stocks under different land uses: A study in an afro-montane landscape in southwestern Uganda,” *Geoderma*, vol. 193–194, pp. 282–289, 2013.
- [67] J. Loaiza, J. Rodriguez, M. Ramirez, and A. Lema, “Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 260, pp. 1906–1913, 2010.
- [68] R. Lal, J. Kimble, R. Follet, and C. Cole, *The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. CRC Press, 1998.
- [69] E. Martinez, J. Fuentes, and E. Acevedo, “Carbono orgánico y propiedades del suelo,” *Rev. la Cienc. del suelo y Nutr. Veg.*, vol. 8, pp. 68–96, 2008.
- [70] P. Bierman-Lytle, “Climate Change Impact on High-Altitude Ecosystems and Their Impact on Human Communities,” in *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems*, 2015, pp. 289–341.
- [71] M. Martínez, O. Pérez, G. Vázquez, G. Castillo, J. Garcia, K. Mehltreter, M. Equihua, R. Landgrave “Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 258, pp. 1856–1863, 2009.

- [72] R. Sánchez, R. Ramos, V. Geissen, J. Mendoza, E. De la Cruz, E. Salcedo, D. Palma. *Latinoam.*, vol. 29, pp. 211–219, 2011.
- [73] Corponariño, “Plan de Gestión Ambiental Regional del departamento de Nariño.” pp. 1–342, 2017.
- [74] N. Portilla, “Cambios de la cobertura de la tierra, según los tipos de paisaje descritos en el metabolismo social. Caso de estudio: occidente de la cuenca del lago Guamués (laguna de La Cocha), Colombia. 1989-2016,” *Entorno Geográfico*, no. 17, pp. 27–50, 2019.
- [75] F. Montané, P. Rovira, and P. Casals, “Shrub enroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant and quality and temperature on soil C and N stocks,” *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 21, no. 4, 2007.
- [76] J. Da Silva, D. Resck, E. Corazza, and L. Vivaldi, “Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the ‘cerrado’ region, Brazil,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 103, no. 2, pp. 357–363, 2004.
- [77] D. Heanes, “Determination of total organic-c in soils by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure,” *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, vol. 15, no. 10, pp. 1191–1213, 1984.
- [78] G. Blake and K. Hartge, “Bulk density,” in *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods.*, 1986, pp. 363–375.
- [79] R. Webster and M. Oliver, *Geostatistics for Environmental Scientists*. 2007.
- [80] J. Gutierrez, N. Ordoñez, A. Bolivia, S. Bunning, M. Guevara, E. Medina, C. Olivera, L. Olmedo, Rodríguez, V. Sevilla, R. Vargas, “Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia,” *Ecosistemas*, vol. 29, pp. 1–10.
- [81] L. Ayala, M. Villa, Z. Aguirre, and N. Aguirre, “Quantification of carbon in the moors of the Yacuri National Park, provinces of Loja and Zamora Chinchipe, Ecuador,” *CEDAMAZ*, vol. 4, pp. 45–52, 2014.
- [82] J. Arteaga, J. Navia, and J. Castillo, “Behavior of chemical variables of a soil subject to different uses, department of Nariño, Colombia,” *Rev. Ciencias Agrícolas*, vol. 33, pp. 62–75, 2016.
- [83] M. Pérez, M. Medina, A. Hurtado, E. Arboleda, and M. Medina, “Reservas de carbono del pasto *Cenchrus clandestinus* (Poaceae) en los sistemas de manejo tradicional y silvopastoril, en diferentes relieves,” *Biol. Trop.*, vol. 67, pp. 768–783, 2019.
- [84] A. Ortiz and M. Medina, “Respuesta del pasto kikuyo a la inoculación: con hongos micorrícicos y a diferentes niveles de nitrógeno y fósforo,” Universidad de Antioquia, 2015.
- [85] K. Esmailzadeh, M. Bahram, R. Moheb, D. Gohar, M. Tohidfar, V. Eremeev, L. Talgree, B. Khaleghdoust, S. Mahyar, A. Luik, E. Loit. “Cropping systems with higher organic carbon promote soil microbial diversity,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 319, pp. 1–9, 2021.

- [86] L. López, A. Monterroso, and J. Gómez, "Organic carbon in agricultural soils of the Mexican tropic," *Rev. Geogr. Agrícola*, vol. 64, pp. 161–181, 2020.
- [87] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. "Caracterización de los suelos y tierras." pp. 64–163.
- [88] M. Sheikn, M. Kumar, and R. Bussmann, "Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya," *Carbon Balanc. Manag.*, vol. 4, pp. 1–6, 2009.
- [89] L. Reyna-Bowen, L. Vera, and L. Reyna, "Soil-organic-carbon concentration and storage under different land uses in the Carrizal-Chone Valley in Ecuador," *Appl. Sci.*, vol. 9, pp. 1–9, 2018.
- [90] F. Zuñiga, J. Huertas, G. Guerrero, J. Sarasty, J. Dörner, and H. Burbano, "Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia," *Terra Latinoam.*, vol. 36, no. 2, pp. 183–196, 2018.
- [91] a Mcdaniel and M. a Wilson, "Physical and chemical characteristics of ash-influenced soils of inland northwest forests," *USDA For. Serv. Proc. RMRS-P-44*, pp. 31–45, 2007.
- [92] M. Astier, J. Maass, J. Etchevers, J. Peña, and F. de León, "Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol," *Soil Tillage Res.*, vol. 88, pp. 153–159, 2006.
- [93] M. Nanzyo, S. Shoji, and R. Dahlgren, "Chapter 7 Physical Characteristics of Volcanic Ash Soils," in *Volcanic Ash Soils*, vol. 21, S. Shoji, M. Nanzyo, and R. B. T.-D. in S. S. Dahlgren, Eds. Elsevier, 1993, pp. 189–207.
- [94] E. Meza and D. Geissert "Structure Stability in Forested and Cultivated Andisols," *Terra Latinoam.*, vol. 24, pp. 163–170, 2005.
- [95] S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren, *Volcanic ash soils: genesis, properties, and utilization*, Elsevier S., vol. 53, no. 9. Soil Science 21, 1993.
- [96] R. Chen and R. Twilley, "A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils," *Biogeochemistry*, vol. 44, pp. 93–118, 2005.
- [97] J. Arvidsson, "Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments.," *Soil Tillage Res.*, vol. 49, pp. 159–170, 1998.
- [98] C. Cazorla, J. Cisneros, I. Moreno, and C. Galarza, "Soil carbon and aggregate stability improvement by fertilization and cover crops," *Cienc. del suelo*, vol. 35, pp. 301–313, 2017.
- [99] I. Zamboni, M. Ballesteros, and A. Zamudio, "Caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos de una mollisol bajo dos coberturas diferentes," *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 35, pp. 191–203, 2006.

- [100] C. Montes, J. Ramos, and A. San José, "Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca - Colombia," *Acta Agron.*, vol. 66, pp. 95–101, 2016.
- [101] R. Zapata, *Los procesos químicos del suelo*. Medellín, 2017.
- [102] J. Six, K. Paustian, E. Elliott, and C. Combrink, "Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate–size classes and aggregate–associated carbon," *Soil Sci. Soc. Am*, vol. 64, pp. 681–689, 2000.
- [103] D. Murty, M. Kirschbaum, R. Mcmurtrie, and H. Mcgilvray, "Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen ? a review of the literature," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 8, pp. 105–123, 2002.
- [104] W. Post and K. Kwon, "Soil carbon sequestration and land-use change : processes and potential," *Glob. Chang. Biol.*, no. 6, pp. 317–327, 2000, doi: Post, WM y Kwon, KC (2000). Secuestro de carbono del suelo y cambio de uso de la tierra: procesos y potencial. *Biología del cambio global*, 6 (3), 317–327.
- [105] E. Matthews, M. Rohweder, R. Payne, and S. Murray, *Carbon Storage and Sequestration. Pilot analysis of global ecosystems*. 2000.
- [106] M. Ibrahim, M. Chacón, C. Cuartas, J. Naranjo, G. Ponce, P. Vega, F. Casasola, J. Rojas. "Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua.," *Agroforestería las Américas*, vol. 45, p. 10, 2007.
- [107] F. Tonneijck, B. Jansen, K. Nierop, J. Verstraten, J. Sevink, and L. De Lange, "Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 61, pp. 392–405, 2010.
- [108] B. Minasny, A. McBratney, B. Malone, M. Lacoste, and C. Walter, "uantitatively Predicting Soil Carbon Across Landscapes," in *Progress in Soil Science*, 2014, pp. 45–47.
- [109] M. Huamán, F. Espinoza, A. Barrial, and Y. Ponce, "Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos," *Sci. Agropecu.*, vol. 12, pp. 83–90, 2021.
- [110] C. Ángeles, "Recuperación de suelos contaminados con metales utilizando plantas y microorganismos rizosféricos.," *Terra Latinoam.*, vol. 23 núm 1, no. 2395–8030, pp. 29–37, 2005.
- [111] R. Guitian and R. Bardgett, "Plant and soil microbial responses to defoliation in temperate seminatural grassland," *Plant Soil*, vol. 220, pp. 271–277, 2000.
- [112] R. Cardinael, T. Chevallier, A. Cambou, C. Béral, C. Dupraz, C. Durand, E. Kouakoua, C. Chenu. "Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 236, pp. 243–255, 2017.
- [113] K. Lorenz and R. Lal, "Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems,"

- Agron. Sustain. Dev.*, vol. 34, pp. 443–454, 2014, doi: Lorenz, K. y Lal, R. (2014). Secuestro de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales. Una revisión. *Agronomía para el desarrollo sostenible*, 34 (2), 443–454.
- [114] J. Ayala, C. Márquez, V. Garcia, C. Jara, J. Sisti, N. Pasqualotto, S. Van Wittenbergthe, J. Delegido. “Multi-predictor mapping of soil organic carbon in the alpine tundra: a case study for the central Ecuadorian páramo,” *Carbon Balanc. Manag.*, vol. 16, pp. 1–19, 2021.
- [115] J. Gweyi, M. Sakha, and J. Jefwa, “Agricultural Interventions to Enhance Climate Change Adaptation of Underutilized Root and Tuber Crops,” in *African Handbook of Climate Change Adaptation*, 2021, pp. 61–66.
- [116] C. Poeplau and A. Don, “Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 200, pp. 33–41, 2015.
- [117] A. Dey, A. Ghosh, R. Bhattacharyya, and P. Tigga, “Belowground Carbon Storage and Dynamics,” in *Soil science: fundamentals to recent advances*, 2021, pp. 49–67.
- [118] M. García, O. Márquez, R. López, and R. Hernández, “Reservas orgánicas y minerales del suelo y su afectación por la deforestación de la selva nublada Estado Mérida, Venezuela,” *Agric. Andin.*, vol. 16, pp. 28–38, 2009.
- [119] A. Rakshit, S. Singh, P. Abhilash, and A. Biswas, *Soil Science: Fundamentals to Recent Advances*. 2021.
- [120] K. Were, B. Singh, and Ø. Dick, “Effects of Land Cover Changes on Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Stocks in the Eastern Mau Forest Reserve, Kenya,” in *Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa*, R. Lal, B. R. Singh, D. L. Mwaseba, D. Kraybill, D. O. Hansen, and L. O. Eik, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 113–133.
- [121] A. Solís, J. Nájera, J. Méndez, B. Vargas, and M. Álvarez, “Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango,” *Investig. Cienc.*, vol. 63, pp. 5–11, 2014.
- [122] H. Jenny, *Factors and soil formation. A system of quantitative pedology*. New York, 1942.
- [123] C. Kallenbach, S. Frey, and A. Grandy, “Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls,” *Nat Commun*, vol. 7, pp. 1–10, 2016.
- [124] K. Wada, “The distinctive properties of andosols,” in *Advances in Soil Science*, New York, 1985, p. 235.
- [125] G. Abera and E. Wolde, “Soil properties, and soil organic carbon stocks of tropical andosol under different land uses,” *Open J. Soil Sci.*, vol. 3, pp. 153–162, 2013.
- [126] M. Tejada, C. Garcia, J. Gonzalez, and M. Hernandez, “Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and

- biological properties of soil," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 38, pp. 1413–1421, 2006.
- [127] L. Ferreras, E. Gomez, S. Toresani, I. Firpo, and R. Rotondo, "Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil," *Bioresour. Technol.*, vol. 97, pp. 635–640, 2006.
- [128] M. Collins and R. Kuehl, *Organic Matter Accumulation and Organic Soils*. 2000.
- [129] S. Goyal, K. Sakamoto, and K. Inubushi, "Microbial biomass and activities along an andosol profile in relation to soil organic matter level," *Microbes and Enviroments*, vol. 15, pp. 143–150, 2000.
- [130] H. Tatsuya *et al.*, "Tillage and cover crop species affect soil organic carbon in Andosol, Kanto, Japan," *Soil Tillage Res.*, vol. 138, pp. 64–72, 2014.
- [131] C. Tiphaine, T. Woignier, J. Touceta, and E. Blancharta, "Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols," *Geoderma*, vol. 159, pp. 182–188, 2010.
- [132] A. Parra, C. Galvis, A. Gómez, H. Criollo, and T. Lagos, "Modelos alternativos con chilacuan (*Vasconcellea cundinamarcensis*) en el humedal Ramsar Laguna de la Cocha, Pasto, Colombia," *Agroforestería Neotrop.*, vol. 2, pp. 19–30, 2012.
- [133] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación "Determinación del pH. NTC 5264." p. 11, 2018.
- [134] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación "Determinación de la conductividad eléctrica. NTC 5596." p. 10, 2008.
- [135] Soil Survey Staff, "Soil Survey Laboratory Information Manual." p. 530, 2011.
- [136] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Determinación de carbono orgánico. NTC 5403." p. 18, 2021.
- [137] G. Sparling, C. Feltham, J. Reynolds, A. West, and P. Singleton, "Estimation of soil microbial c by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the kec-factor," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 22, pp. 301–307, 1990.
- [138] J. Anderson and J. Ingram, *Tropical soil biology and fertility : a handbook of methods*. 1993.
- [139] K. Alef and P. Nannipieri, *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. 1995.
- [140] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Determinación de la textura por Bouyoucos. NTC 6299." p. 11, 2018.
- [141] C. Jensen, R. Luxmoore, S. VanGudndy, and L. Stolzy, "Root Air Space Measurements by a Pycnometer Method," *Agron. J.*, vol. 61, p. 474, 1969.
- [142] D. Rowel, *Soil science: Methods & applications*. 1994.
- [143] F. Fernandez, "Desarrollo de modelo para determinar el stock de carbono orgánico

- del suelo con base en reflectancia difusa. Caso: Carimagua - Meta," Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [144] M. Blasco, "Características químicas de los suelos volcánicos de Nariño, Colombia," *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*. pp. 81–86, 1969.
- [145] M. Reza, R. Alimardani, and A. Sharifi, "How can soil electrical conductivity measurements control soil pollution?," *Res J Env. Earth Sci*, vol. 2, pp. 235–8, 2010.
- [146] M. Simon, N. Peralta, and J. Costa, "Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes," *Cienc. del Suelo*, vol. 31, pp. 45–55, 2013.
- [147] L. Chai, G. Hernadez, D. Hik, I. Barrio, C. Frost, C. Chinchilla, G. Esquivel "A methane sink in the Central American high elevation páramo: Topographic, soil moisture and vegetation effects," *Geoderma*, vol. 362, 2020.
- [148] M. Sierra, J. Arismendi, and M. Cerón, "Descripción de las relaciones entre parámetros químicos en suelos de fincas lecheras del norte de Antioquia, Colombia," *Investig. Ganad. para el Desarro. Rural*, vol. 31, 2019.
- [149] C. Parelho, A. Rodrigues, J. Cruz, and P. Garcia, "Linking trace metals and agricultural land use in volcanic soils — A multivariate approach," *Sci. Total Environ.*, vol. 496, pp. 241–247, 2014.
- [150] L. Estupiñan, J. Gomez, V. Barrantes, and L. Limas, "Effect caused by agricultural activities on soil characteristics in the paramo El Granizo (Cundinamarca-Colombia)," *Rev. U.D.C.A Act Div. Cient*, vol. 12, pp. 79–89, 2009.
- [151] R. Quintero, "Sugarcane fertilization management with special reference to Colombian experimental results," *Int. Soc. Soil Sci.*, pp. 382–393, 1994.
- [152] J. Arteaga, J. Navia, and J. Castillo, "Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia," *Rev. Cienc. Agr*, vol. 33, pp. 62–75, 2016.
- [153] R. Ramirez and R. Rodriguez, "Cambios en el contenido de carbono orgánico e índice de estabilidad estructural procedentes de varios usos de suelo de sistemas ganaderos," *Rev. Colomb. Ciencias Pecuárias*, vol. 28, p. 220, 2015.
- [154] D. Malagón, C. Pulido, R. Llinas, C. Chamorro, and J. Fernández, *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, 1996.
- [155] J. Powers, "Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica.," *Ecosystem*, vol. 7, pp. 134–146, 2004.
- [156] E. Diaz, E. Amézquita, and J. Menjivar, "Distribución del contenido de carbono orgánico en agregados de diferentes tamaños, procedentes de varios sistemas de uso y altitudes en suelos de la cuenca del Rio Cauca, Colombia," Universidad

- Nacional de Colombia, 2008.
- [157] J. Carúa, M. Proaño, D. Suarez, and P. Podwojevski, "Determinación de retención de agua en los suelos de los páramos estudio de caso en la subcuenca del Río San Pedro, Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador." pp. 27–38, 2008.
- [158] V. Gómez and V. Badia, "Soil Distribution and Classification," in *The Soils of Spain*, 2016, p. 207.
- [159] Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales, "El Macizo Colombiano y su área de influencia." Bogotá, pp. 64–163, 1999.
- [160] M. Cantú, A. Becker, J. Bedano, and H. Schiavo, "Soil Quality Evaluation Using Indicators and Indices," *Ci. Suelo*, vol. 25, pp. 173–178, 2007.
- [161] M. Cardenas and C. Tobón, "Rehabilitation of hydrological functioning of páramo ecosystems in Colombia," *Rev. hidrológica páramos*, vol. 20, pp. 403–412, 2017.
- [162] F. Cheng *et al.*, "Soil Microbial Biomass, Basal Respiration and Enzyme Activity of Main Forest Types in the Qinling Mountains," *PLoS One*, vol. 8, pp. 1–12, 2013.
- [163] R. Haynes, "Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management," *Biol Fertil Soils*, vol. 30, pp. 210–216, 1999.
- [164] M. Ordoñez, L. Galicia, and J. Casanova, "Evaluation of land use change on an andosol through physicochemical and biological indicators," *Trop. Grasslands*, vol. 10, pp. 52–62, 2022.
- [165] X. Xu, J. Schimel, P. Thornton, X. Song, F. Yuan, and S. Goswami, "Substrate and environmental controls on microbial assimilation of soil organic carbon: a framework for Earth system models," *Ecol. Lett.*, vol. 17, pp. 547–555, 2014.
- [166] I. Bolat, "Microbial biomass, basal respiration, and microbial indices of soil in diverse croplands in a region of northwestern Turkey (Bartın)," *Env. Monit Assess*, vol. 191, pp. 1–13, 2019.
- [167] R. Creamer, R. Shulte, D. Stone, A. Gal, P. Krong, G. Lo Papa, P. Murray, G. Pérez, B. Foerster, M. Rutgers, J. Sousa, A. Winding. "Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter?," *Ecol. Indic.*, vol. 46, pp. 409–418, 2014.
- [168] H. Insam and K. Domsh, "Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites," *Microbial Ecol.*, vol. 15, pp. 177–188, 1988.
- [169] E. Gregorich, M. Carter, D. Angers, C. Monreal, and B. Ellert, "Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils," *Can. J. Soil Sci.*, vol. 74, pp. 367–385, 1994.
- [170] R. Hernandez and D. López, "Efecto de la intensidad de la labranza sobre diversas fracciones de la materia orgánica y la estabilidad estructural de un suelo de sabana," *Ecotropicos*, vol. 11, pp. 69–80, 1998.
- [171] W. Durango, L. Uribe, C. Hernández, and R. Mata, "Respiración, biomasa

- microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica," *Agron. Costarric.*, vol. 39, pp. 37–46, 2015.
- [172] K. Smith and F. Conen, "Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases," *Soil Use Manag.*, vol. 20, pp. 255–263, 2004.
- [173] J. Kimble, H. Eswaran, and T. Cook, "Organic carbon on a volume basis in tropical and temperate soils.," in *Trans Int. Congr. Soil Scie 14th*, 1990, pp. 248–258.
- [174] L. Castro, "Efecto del uso agrícola y el barbecho sobre los contenidos de biomasa microbiana de ultisoles y andisoles de Costa Rica," *Agron. Costarric.*, vol. 19, pp. 59–65, 1995.
- [175] C. Heuck, B. Weig, and M. Spohn, "Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 85, pp. 119–129, 2015.
- [176] S. Maia, F. Xavier, A. Oliveira, E. Mendonça, and J. Araujo, "Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil," *Agroforest Syst*, vol. 71, pp. 127–138, 2007.
- [177] E. Zagal and C. Córdova, "Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado," *Agric. Técnica*, vol. 65, pp. 186–197, 2005.
- [178] R. Joergensena and X. Castillo, "Interrelationships between microbial and soil properties in young volcanic ash soils of Nicaragua," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 33, pp. 1581–1589, 2001.
- [179] J. Anderson and K. Domsh, "Ratios of microbial biomass carbon to total carbon in arable soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 21, pp. 471–479, 1989.
- [180] H. Insam, "Are the microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime?," *Soil Biol Biochem*, vol. 4, pp. 525–532, 1990.
- [181] Y. Pardo, J. Paolini, and M. Cantero, "Microbial biomass and basal soil respiration under agroforestry systems with coffee crops," *Actual. Divulg. Científica*, vol. 22, pp. 1–8, 2019.
- [182] H. Gonzalez, P. González, Z. Pineda, H. Escalante, G. Rodriguez, and A. Soto, "Microbiota edáfica en lotes de plátano con vigor contrastante y su relación con propiedades del suelo," *Bioagro*, vol. 33, pp. 143–148, 2021.
- [183] G. Sparling, "Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter," *Aust. J. Soil*, vol. 30, pp. 195–207, 1992.
- [184] F. Varma, A Buscot, "Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions," in *Soil Biology*, 2005, p. 426.
- [185] M. Chinchilla, R. Mata, and A. Alvarado, "Andisoles, inceptisoles y entisoles de la subcuenca del río Pirrís, región de los Santos, Talamanca, Costa Rica," *Agron. Costarric.*, vol. 35, pp. 83–107, 2011.

- [186] I. Novillo, M. Carrillo, J. Cargua, V. Nabel, K. Albán, and F. Morales, "Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador," *Temas Agrar.*, vol. 23, pp. 177–187, 2018.
- [187] X. Hao, B. Ball, M. Culley, and G. Parkin, "Soil Density and Porosity," in *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2019, pp. 743–759.
- [188] O. Seguel, C. Parra, L. Homer, C. Kremer, and M. Beyá, "Efecto del ácido húmico sobre la propiedades físicas de un Haplohumult cultivado con trigo," *Agro Sur*, vol. 47, pp. 27–38, 2019.
- [189] J. Rühlmann, M. Körschens, and J. Graefe, "A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix," *Geoderma*, vol. 130, pp. 272–283, 2006.
- [190] T. Maeda, H. Takenaka, and B. Warkentin, "Physical properties of allophane soils," *Adv. Agron.*, vol. 29, pp. 229–264, 1977.
- [191] P. Imbellone and O. Barbosa, "Los suelos derivados de cenizas volcánicas en la provincia del Neuquén, Argentina," in *Suelos y vulcanismo*, Buenos Aires, 2020, p. 330.
- [192] P. Broquen, G. Falbo, C. Frugoni, L. Girardin, M. Guido, and P. Martinese, "Estructura y porosidad en andisoles con vegetación natural y con plantaciones de *Pinus ponderosa* Dougl. en el sudoeste de Neuquén, Argentina," *Bosque*, vol. 22, pp. 25–36, 2000.
- [193] R. Perestelo, "Caracterización de Andisoles de alta montaña de la isla de La Palma," Universidad de la Laguna, 2017.
- [194] J. Otero, A. Figueroa, F. Muñoz, and M. Peña, "Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro ecosystems within an Andean paramo area," *Ecol. Eng.*, vol. 37, pp. 2035–2043, 2011.
- [195] D. Mejia, D. Angel, and J. Menjivar, "Phosphorus fractions in soils of the Valle del Cauca under different coffee crop systems," *Acta Agron.*, vol. 60, pp. 258–268, 2011.
- [196] M. Dorel, J. Roger, H. Manichon, and B. Delvaux, "Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils," *Soil Use Manag.*, vol. 16, pp. 133–140, 2000.
- [197] P. Podwojewski, J. Poulenard, T. Zambrana, and R. Hofstede, "Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador)," *Soil Use Manag.*, vol. 18, pp. 45–55, 2006.
- [198] B. Volverás, J. Merchancano, J. Campo, and J. López, "Propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra wachado en Nariño, Colombia," *Agron. Mesoam.*, vol. 31, pp. 743–760, 2020.
- [199] E. Apráez and O. Moncayo, "Laboreo y fertilización del kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst): efecto sobre las variables edáficas," *Arch. Zootec.*, vol. 55, no. 39–50, 2006.
- [200] M. Daza, F. Hernandez, and F. Traiana, "Efecto del uso de suelo en la capacidad de

- almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia,” *Rev. Fac. Nac. Agron.*, vol. 67, pp. 7189–7200, 2014.
- [201] R. Robert, “Water capacity of paramo soils.” pp. 1–25, 2018.
- [202] D. Ceballos, O. Hernandez, and J. Vélez, “Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del departamento de Nariño,” *Rev. Agron.*, vol. 27, pp. 40–48, 2010.
- [203] M. Carrasco, D. Dec, S. Valle, E. Zuñiga, and J. Dörner, “Historial de uso de un suelo Ñadi: consecuencias sobre la capacidad efectiva de almacenamiento de agua aire y la continuidad del medio poroso,” *Agro Sur*, vol. 45, pp. 39–51, 2017.
- [204] G. Wilson and R. Luxmoore, “Infiltration, Macroporosity, and Mesoporosity Distributions on Two Forested Watersheds,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 52, pp. 329–335, 1988.
- [205] B. Volverás, E. Amezcuita, and J. Campo, “Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia,” *Corpoica Cienc. Tecnol Agropecu.*, vol. 17, pp. 361–377, 2016.
- [206] G. Falsone, E. Bonifacio, and E. Zanini, “Structure development in aggregates of poorly developed soils through the analysis of the pore system,” *Catena*, vol. 95, pp. 169–176, 2012.
- [207] R. Schaetzl and S. Anderson. *Soil Genesis and Geomorphology*. New York, 2005
- [208] C. Feller, A. Albrecht, E. Blanchart, Y. Cabidoche, T. Chevallier, V. Hartmann, V. Eschenbrenner, M. Larré, J. Ndandou, “Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils,” *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, vol. 61, pp. 19–31, 2001.
- [209] F. Paz, S. Covadela, and J. Etchevers, “Distribución del carbono orgánico en los diferentes tamaños de partículas del suelo: modelo simple de cinética lineal,” *Terra Latinoam.*, vol. 32, pp. 127–142, 2014.
- [210] P. Howard and D. Howard, “Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons,” *Biol Fertil Soils*, vol. 9, pp. 306–310, 1990.
- [211] E. Kandeler, M. Stemmer, and E. Klimanek, “Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 31, pp. 261–273, 1999.
- [212] S. Iwasaki, Y. Endo, and R. Hatano, “The effect of organic matter application on carbon sequestration and soil fertility in upland fields of different types of Andosols,” *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 63, pp. 200–220, 2017.
- [213] C. Muñoz, E. Zagal, and C. Ovalle, “Influence of tree on soil organic matter in Mediterranean agroforestry systems: an example from the ‘Espinal’ of central Chile,” *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 58, pp. 728–735, 2007.

- [214] C. Gamarra, M. Díaz, M. Vera, M. Galeano, and A. Cabrera, "Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco Paraguayo," *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 9, pp. 4–26, 2017.
- [215] J. Fontes, M. Cameira, L. Borda, E. Amado, and L. Pereira, "Nitrogen dynamics in volcanic soils under permanent pasture," *Geoderma*, vol. 160, pp. 384–393, 2011.
- [216] P. Undurraga, E. Zagal, G. Sepúlveda, and N. Valderrama, "Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in Andisol for Six Crop Rotations with Different Soil Management Intensity," *Chil. journal Agric. reserarch*, vol. 69, pp. 445–454, 2009.
- [217] C. Bronick and R. Lal, "Soil structure and management: a review," *Geoderma*, vol. 124, pp. 3–22, 2005.
- [218] M. Naveed, P. Moldrup, H. Jörg, M. Lamandé, D. Wildenschild, M. Tuller, L. Wollesen. "Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution," *Geoderma*, vol. 217–218, pp. 181–189, 2014.
- [219] E. Meza and D. Geissert, "Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre de Perote, Veracruz, México," *For. Veracruzana*, vol. 5, pp. 57–60, 2003.
- [220] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. "La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050," *Rome 12-13 de Octubre*, 2009.
- [221] A. Józefowska, J. Loaiza, and O. Schmidt, "Chapter 8 - Consequences of land-use changes for soil quality and function, with a focus on the EU and Latin America," in *Climate Change and Soil Interactions*, 2020, pp. 207–228.
- [222] A. Bautista, J. Etchevers, R. Del Castillo, and C. Gutierrez, "La calidad del suelo y sus indicadores."
- [223] J. Doran, M. Sarrantonio, and M. Liebig, "Soil Health and Sustainability," *Av. Agron.*, vol. 56, pp. 1–54, 1996.
- [224] M. Frąç, J. Lipiec, B. Usowicz, K. Oszust, and M. Brzezinska, "Structural and functional microbialdiversity of sandy soil under croplandand grassland," *PeerJ*, pp. 2–24, 2019.
- [225] Z. Wang, Y. Liu, L. Zhao, W. Zhang, and L. Liu, "Change of soil microbial community under long-term fertilization in a reclaimed sandy agricultural ecosystem," *PeerJ*, pp. 1–21, 2019.
- [226] L. Fernandez, M. Gonzalez, and V. Sáez, "Relación entre un índice de estabilidad estructural de suelo, la zona bioclimática y la posición fisiográfica en Venezuela," *Terra Nueva Etapa*, vol. 32, pp. 139–149, 2016.
- [227] K. Farley, E. Kelly, and R. Hofstede, "Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes," *Ecosystems*, vol. 7, pp. 729–739, 2004.
- [228] A. Franzluebbers, "Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality," *Soil Tillage Res.*, vol. 2002, pp. 95–106, 66AD.

- [229] N. Lopez, L. Muñoz, J. Zambrano, J. Castro, and O. Miramag, "Plan de manejo 2006-2010 Santuario de flora isla corota." pp. 1–95, 2009.
- [230] I. Pla, "Metodología para la caracterización física con fines de diagnostico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales," *Rev. la Fac. Agron. Alcance*, vol. 32, p. 91, 1983.
- [231] D. Lobo and M. Pulido, "Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos," *Venesuelos*, vol. 14, pp. 22–37, 2011.
- [232] G. Montenegro and C. Malagón, "Propiedades físicas de los suelos." Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, p. 812, 1990.
- [233] L. Garcia and L. Parras, "Short-term effects of olive mill by-products on soil organic carbon, total N, C:N ratio and stratification ratios in a Mediterranean olive grove," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 165, pp. 68–73, 2013.
- [234] M. Díaz and J. Grove, "Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs," *Soil Tillage Res.*, vol. 66, pp. 165–174, 2002.
- [235] Y. Kooch, S. Ehsani, and M. Akbarinia, "Stratification of soil organic matter and biota dynamics in natural and anthropogenic ecosystems," *Soil Tillage Res.*, vol. 200, pp. 1–11, 2020.
- [236] J. De Moraes and R. Lal, "Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol," *Soil Tillage Res.*, vol. 103, pp. 46–56, 2009.
- [237] P. Zhang, W. Ting, L. Yuling, J. Zhikuan, H. QingFang, and R. Xialong, "Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C:N ratio in a semiarid region of China," *Soil Tillage Res.*, vol. 153, pp. 28–35, 2015.
- [238] M. Parra, R. Fernandez, C. Navarro, and O. Arquero, *Los Suelos Y La Fertilizacion Del Olivar Cultivado En Zonas Calcareas*. 2003.
- [239] J. Salton *et al.*, "Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em mato grosso do sul," *R. Bras. Ci. Solo.*, vol. 32, pp. 11–21, 2008.
- [240] M. Ruiz, G. Elizalde, and J. Paolini, "Caracterización de las sustancias húmicas preentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias," *Agron. Trop*, vol. 47, pp. 381–395, 1997.
- [241] C. Martinez, I. Bravo, and F. Martin, "Composición química de ácidos húmicos provenientes de suelos altoandinos con diferente uso," *Suelos Ecuatoriales*, vol. 43, pp. 61–66, 2013.
- [242] H. Montenegro, "Interpretación de las propiedades físicas de lo suelos," in *Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego.*, 1990, pp. 99–137.

- [243] K. Paustian, J. Six, E. Elliott, and H. Hunt, "Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils," *Biogeochemistry*, vol. 48, pp. 147–163, 2000.
- [244] J. Mora, J. Guerra, J. Notario, A. Rodriguez, and C. Arbelo, "Parámetros físico-químicos que influyen en la erodibilidad de andosoles y suelos ándicos bajo vegetación forestal (I. Canarias)," *Edafología*, vol. 10, pp. 207–213, 2003.
- [245] B. Cadena, D. Egas, H. Ruiz, J. Mosquera, and O. Benavides, "Effect of five tillage systems on soil erosion of a haplustand vitric soil sown with potato (*Solanum tuberosum* L.)," *Rev. Ciencias Agrícolas*, vol. 2, pp. 116–128, 2012.
- [246] F. Rhoton, "Influence of time on soil response to no-till practices," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 2, pp. 700–709, 2000.
- [247] K. Chaney and R. Swift, "The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils," *J. Soil Sci.*, vol. 35, pp. 223–230, 1984.
- [248] A. Wright and F. Hons, "Soil Carbon and Nitrogen Storage in Aggregates from Different Tillage and Crop Regimes," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 69, pp. 141–147, 2005.
- [249] C. Fortun and A. Fortun, "Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización de los agregados del suelo," *Edagol. Agrobiol*, vol. 48, pp. 185–204, 1989.
- [250] H. Holeplass, R. Singh, and R. Lal, "Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotation and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway," *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, vol. 70, pp. 167–177, 2004.
- [251] C. Harden, "Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes," *Geomorphology*, vol. 79, pp. 249–263, 2006.
- [252] F. Rezanezhad, J. Price, W. Quinton, B. Lennartz, T. Milojevic, and P. Van Cappellen, "Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists," *Chem. Geol.*, vol. 429, pp. 75–84, 2016.
- [253] M. Truller and D. Or, "Water retention and characteristic curve," *Encycl. Soils Environ.*, pp. 278–289, 2005.
- [254] S. Tyler and S. Wheatcraft, "Fractal processes in soil water retention," *Fractal Process. soil water Retent.*, vol. 26, pp. 1047–1054, 1990.
- [255] S. Patiño, Y. Hernandez, C. Plata, J. Dominguez, M. Daza, R. Oviedo, W. Buytaert, B. Ochoa. "Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering," *Catena*, vol. 202, pp. 105–227, 2021.
- [256] E. Hincapie and C. Tobón, "Dinámica del agua en andisoles bajo condiciones de ladera," *Rev. Fac. Nac. Agron*, vol. 65, pp. 6765–6777, 2012.
- [257] M. Henao, B. Delvaux, and S. Suarez, "Comparación de dos métodos de análisis de análisis granulométrico aplicados en Andisoles de la zona cafetera central de Colombia," *Cenicafé*, vol. 48, pp. 12–25, 1997.

- [258] E. Van Ranst, S. Utami, and J. Shamshuddin, "Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: physico-chemical properties and classification," *Soil Sci.*, vol. 167, pp. 68–79, 2002.
- [259] E. Salcedo, A. Galvis, T. Hernandez, R. Rodriguez, F. Zamora, R. Bugarin, R. Carillo. "La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo," *Terra Latinoam.*, vol. 25, pp. 419–425, 2007.
- [260] V. Hansen and O. Israelsen, "Irrigation principles and practices." pp. 222–238, 1980.
- [261] L. La Manna, M. Tarabini, F. Gómez, P. Noli, B. Vogel, and C. Buduba, "Estimación de la capacidad de retención de agua de suelos volcánicos en función de variables de fácil determinación a campo," *Asoc. Argentina Ciencia del Suelo*, vol. 36, pp. 23–29, 2018.
- [262] R. Chicas, E. Vanegas, and N. García, "Indirect determination of the capacity to hold moisture in soils of the sub basin of the Torjá River, Chiquimula, Guatemala," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 23, pp. 41–46, 2014.
- [263] I. Chirinos and J. Díaz, "Variación de la capacidad de retención de humedad de dos suelos como respuesta al uso de diferentes dosis de material orgánico compostado," *Ciencia*, vol. 16, pp. 104–110, 2008.
- [264] C. Pineda and J. Viloria, "Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en los suelos de la cuenca del lago de Valencia," *Venesuelos*, pp. 39–45, 2011.
- [265] B. Santiago, M. Martínez, E. Rubio, H. Vaquero, and J. Sánchez, "Variabilidad de espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México," *Agric. Soc. Desarro.*, vol. 15, pp. 275–288, 2018.
- [266] T. Huntington, "Available water capacity and soil organic matter," *Encycl. Soil Sci. Second Ed.*, vol. 12, pp. 139–143, 2007.
- [267] N. Brady and R. Weil, *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River NJ, 2008.
- [268] L. Lince, "Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas," *Cenicafé*, vol. 72, pp. 7–22, 2021.
- [269] M. Poca, A. Cingolani, D. Gurvich, J. Whitworth, and V. Saur, "La degradación de los bosques de altura del centro de Argentina reduce su capacidad de almacenamiento de agua," *Ecol. Austral*, vol. 28, pp. 235–248, 2018.
- [270] M. Mohanty *et al.*, "Pedotransfer functions for estimating water content at field capacity and wilting point of Indian soils using particle size distribution and bulk density," *J. Agric. Phys.*, vol. 14, pp. 1–9, 2014.
- [271] M. Das and O. Verma, "Derivation and validation of pedotransfer functions for point estimation of soil moisture in sandy to clayey soil texture," *Aric. Phys.*, vol. 11, pp. 21–25, 2011.

- [272] D. Cassel and D. Nielsen, "Field Capacity and Available Water Capacity," in *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 1986, pp. 901–926.
- [273] R. Teepe, H. Dilling, and F. Beese, "Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density," *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol. 166, pp. 111–119, 2003.