



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ECOSISTEMAS

**PERFIL DE CARBONO ORGÁNICO DE SUELO BAJO EFECTO TOPOGRÁFICO
DEL BOSQUE PIEMONTANO EN INMEDIACIONES DE LA RESERVA
BIOLÓGICA COLONSO CHALUPAS**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ECOSISTEMAS

AUTOR: Alex Marlon Girón Montenegro

TUTOR: PhD. Silvia Alejandra Llerena Gordillo

Tena – Ecuador

2025

Carrera ingeniería en ecosistemas

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 14 de marzo de 2025

Yo, Alex Marlon Girón Montenegro, con documento de identidad 1726724188, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniero en ecosistemas, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación, son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alex', is written over a horizontal line.

Alex Marlon Girón Montenegro
C.I: 1726724188

Carrera Ingeniería en Ecosistemas

Autorización de publicación en el repositorio institucional

Tena, 14 de marzo de 2025

Yo, Alex Marlon Girón Montenegro, con documento de identidad 1726724188 en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Perfil de carbono orgánico de suelo bajo efecto topográfico del bosque piemontano en inmediaciones de la Reserva Biológica Colonso Chalupas”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.



Alex Marlon Girón Montenegro
C.I: 1726724188

Carrera ingeniería en ecosistemas

Certificado de dirección de trabajo de titulación

Tena, 14 de marzo de 2025

Certifico que el trabajo de titulación: “Perfil de carbono orgánico de suelo bajo efecto topográfico del bosque piemontano en inmediaciones de la Reserva Biológica Colonso Chalupas”, aprobado bajo el mecanismo de titulación de tesis, fue realizado por Alex Marlon Girón Montenegro, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.



Tutora
Silvia Alejandra Llerena Gordillo
C.I: 1715410625

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental en este camino. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y sus palabras de aliento en los momentos de mayor desafío. Su confianza en mí ha sido mi mayor motivación.

A mi tutora, Silvia Alejandra Llerena Gordillo, por su guía, paciencia y valiosas orientaciones durante el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento y dedicación han sido esenciales para alcanzar los objetivos de esta investigación.

A la Universidad Regional Amazónica Ikiam y a la Facultad de Ciencias de la Vida, por brindarme las herramientas académicas y científicas necesarias para la realización de esta tesis.

A mi enamorada Alexandra y su mascota Bolita quienes con su cariño, paciencia y apoyo incondicional me han acompañado en cada etapa de este proceso. Gracias por creer en mí y por ser una fuente de motivación constante.

A “Drogo” mi gran compañero de cuatro patas, que con su ternura y ocurrencias supo alegrar mis días de estudio y brindarme momentos de descanso y felicidad.

A mis compañeros y amigos, quienes compartieron este viaje académico, brindándome apoyo, consejos y momentos de aprendizaje mutuo. Gracias por hacer de este proceso una experiencia enriquecedora.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, han sido parte de esta etapa de mi vida y han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

¡Gracias!

DEDICATORIA

Con mucho amor y gratitud, dedico este trabajo a mis padres, Dora Corina Montenegro Tatamuez y Marlon Iván Girón Amaguayo, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este camino.

A mi madre, por su amor infinito, su fortaleza inquebrantable y sus sacrificios, que me han enseñado el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por ser mi guía y por brindarme siempre su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi padre, por ser mi ejemplo de disciplina, trabajo y dedicación. Gracias por enseñarme el valor del compromiso y la constancia, y por impulsarme a seguir adelante con determinación y confianza en mí mismo.

Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, por haberme acompañado en cada paso, por sus palabras de aliento y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

Con todo mi cariño y admiración, les dedico este esfuerzo que es el reflejo de su amor, enseñanzas y apoyo inquebrantable.

Gracias por todo.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	
Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad.....	ii
Autorización de publicación en el repositorio institucional.....	iii
Certificado de dirección de trabajo de titulación.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO (I, II, III, IV, V)	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento de problema	6
1.3 Justificación de la investigación	8
1.4 Objetivos de la investigación	9
1.4.1 <i>General</i>	9
1.4.2 <i>Específicos</i>	10
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	10
2.1 Sitio de estudio	10
2.2 Criterios de selección y cálculo de altitud y pendiente	11
2.3 Diseño experimental	13
2.3.1 <i>Diseño bifactorial de dos niveles</i>	13
2.3.2 <i>Repeticiones y distribución</i>	14
2.3.3 <i>Diseño al azar</i>	14
2.4 Muestreo por profundidad	16
2.5 Muestreo de suelo	17
2.6 Muestreo y cálculo de densidad aparente	18
2.7 Análisis de Laboratorio	18
2.8 Análisis estadísticos	21
2.8.1 <i>Pruebas de supuestos</i>	21
2.8.2 <i>Análisis de la varianza (ANOVA)</i>	21
2.8.3 <i>Análisis de correlación</i>	22

2.8.4	<i>Regresión lineal múltiple</i>	22
2.8.5	<i>Análisis descriptivo</i>	22
Capítulo III RESULTADOS.....		23
3.1	Distribución vertical del contenido de COS a un metro de profundidad bajo diferente altitud y pendiente.....	23
3.2	Contenido total de COS a un metro de profundidad.....	26
3.3	Efecto de la pendiente y altitud sobre el contenido de COS.....	27
3.3.1	<i>Análisis ANOVA</i>	27
3.3.2	<i>Análisis post hoc de TUKEY</i>	28
3.3.3	<i>Análisis post hoc de Tukey para cada combinación de interacción pendiente-altitud con COS</i>	29
3.3.4	<i>Boxplot para las combinaciones altitud-pendiente</i>	31
3.4	Correlaciones entre variables.....	33
3.5	Modelo de regresión lineal múltiple.....	34
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN.....		37
4.1	Análisis del contenido de COS.....	37
4.2	Distribución vertical de COS.....	38
4.3	Efecto altitud pendiente.....	39
4.4	Análisis de correlación.....	40
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN.....		42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Tratamientos resultantes a partir de los 2 factores y 2 niveles definidos.....	14
Tabla 2-3:	Media $\pm$ error estándar de variables edáficas bajo diferentes combinaciones de altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente (<10° y >30°).....	24
Tabla 3-3:	Porcentaje de COS en la capa superior (0-20 cm) y en la capa más profunda (20 - 80).....	25
Tabla 4-3:	COS (t/ha) total a un metro de profundidad bajo diferente pendiente y altitud.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Mapa del área de estudio.....	11
Figura 2-2:	Puntos aleatorios.....	15
Figura 3-2:	Selección de las 12 subparcelas.....	16
Figura 4-2:	Esquema de las subparcelas utilizadas para la recolección de muestras de suelo.....	17
Figura 5-2:	Fase de laboratorio.....	19
Figura 6-3:	Distribución vertical del contenido de COS.....	24
Figura 7-3:	Porcentaje de COS en la capa superior (0-20 cm) y en la capa más profunda (20 - 80).....	26
Figura 8-3:	Efecto de la altitud y pendiente sobre el COS.....	28
Figura 9-3:	Comparaciones de la distribución de COS en función a la altitud y pendiente.....	29
Figura 10-3:	Prueba de Tukey para las variables altitud y pendiente.....	31
Figura 11-3:	Comparación de las distribuciones de COS en función de altitud y pendiente.....	32
Figura 12-3:	Matriz de correlación.....	34
Figura 13-3:	Modelo de regresion lineal multiple	36

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Fotografías muestreo en campo

ANEXO B: Fotografías fase de laboratorio

RESUMEN

El carbono orgánico del suelo es un componente clave en los ciclos biogeoquímicos y en la regulación del clima, desempeñando un papel fundamental en la fertilidad del suelo y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas terrestres. El presente estudio evaluó el perfil vertical de carbono orgánico del suelo (COS) a un metro de profundidad bajo efecto de diferente altitud y pendiente en un bosque siempreverde piemontano nororiental de la cordillera de los andes, en las inmediaciones de la Reserva Biológica Colonso Chalupas, Ecuador. Se realizaron muestreos en 12 subparcelas distribuidas en dos altitudes (550 y 950 m s.n.m.) y dos categorías de pendiente ($<10^\circ$ y $>30^\circ$), recolectando muestras a diferentes profundidades (0-100 cm). Los resultados muestran que la altitud es el factor con mayor influencia en la acumulación de COS, observándose valores significativamente más altos a 950 m s.n.m. Además, las pendientes pronunciadas ($>30^\circ$) presentan un mayor almacenamiento de COS en comparación con las pendientes suaves ($<10^\circ$), lo que podría atribuirse a una menor intervención antropogénica y a la redistribución del carbono en el paisaje. La distribución vertical del COS confirma que entre el 26% y el 31% del carbono total se encuentra en la capa superficial (0-20 cm), con valores entre 63.39 ± 4.14 t/ha y 140.49 ± 2.63 t/ha. Los horizontes más profundos (20-100 cm) contienen entre el 69% y el 74% del COS total. En cuanto al contenido total de COS a un metro de profundidad, se encontraron valores entre 204.48 ± 13.38 t/ha y 520.35 ± 7.78 t/ha. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar factores topográficos en la cuantificación del carbono edáfico y en el diseño de estrategias para la conservación de suelos en ecosistemas tropicales.

Palabras clave: Secuestro de carbono, altitud, pendiente, bosque siempreverde piemontano, distribución vertical de carbono.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is a key component in biogeochemical cycles and climate regulation, playing a fundamental role in soil fertility and carbon storage in terrestrial ecosystems. This study evaluated the vertical profile of SOC at a depth of one meter under the influence of different altitudes and slopes in a northeastern evergreen piedmont forest of the Andean Cordillera, near the Reserva Biológica Colonso Chalupas, Ecuador. Sampling was conducted in 12 subplots distributed across two altitudinal levels (550 and 950 m a.s.l.) and two slope categories ($<10^\circ$ and $>30^\circ$), collecting soil samples at different depths (0-100 cm). The results indicate that altitude is the most influential factor in SOC accumulation, with significantly higher values at 950 m a.s.l. Additionally, steeper slopes ($>30^\circ$) exhibited greater SOC storage compared to gentler slopes ($<10^\circ$), which could be attributed to reduced human intervention and the redistribution of carbon within the landscape. The vertical distribution of SOC confirms that between 26% and 31% of the total carbon is concentrated in the surface layer (0-20 cm), with values ranging from 63.39 ± 4.14 t/ha to 140.49 ± 2.63 t/ha. Deeper horizons (20-100 cm) contained 69% to 74% of the total SOC. Regarding the total SOC content at a depth of one meter, values ranged from 204.48 ± 13.38 t/ha to 520.35 ± 7.78 t/ha. These findings highlight the importance of considering topographic factors in soil carbon quantification and in the development of soil conservation strategies in tropical ecosystems.

Keywords: carbon sequestration, altitude, slope, evergreen piedmont forest, vertical carbon distribution.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El ciclo del carbono (C) es un proceso fundamental que desempeña roles cruciales en la regulación climática y el sustento de la vida, la disponibilidad de C ejerce un impacto directo en procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración de la vegetación, la descomposición de la materia orgánica y la mineralización (Fernández-Martínez et al., 2014). Los bosques juegan un rol fundamental en este ciclo y en la mitigación del cambio climático, ayudando a reducir la concentración de dióxido de carbono atmosférico (Fagua et al., 2023). Esto se debe a su función como sumidero de C a través de su biomasa aérea, subterránea y carbono orgánico del suelo (COS). Los suelos representan el mayor reservorio terrestre de carbono, constituye el segundo mayor sumidero de C en el planeta, siendo superado por los océanos (Burbano Orjuela, 2018). El contenido de COS es tres veces superior al del carbono almacenado en la vegetación global (Guo et al., 2023), aumentando la contribución del 44% al 56% de las reservas totales de C de los ecosistemas forestales (Domke et al., 2017) lo que los convierte en actores clave para la estabilidad climática.

Los cambios en las condiciones climáticas, como el aumento de la temperatura, la variabilidad en las precipitaciones y las concentraciones elevadas de CO₂, afectan significativamente las dinámicas del COS, promoviendo tanto su acumulación como su descomposición (Guo et al., 2023; Ahmad et al., 2023). Además, las actividades antropogénicas, como la deforestación, el uso intensivo del suelo y las malas prácticas agrícolas, han exacerbado la liberación de gases de efecto invernadero desde los suelos, acelerando el calentamiento global (Ahmad et al., 2023). Conocer las reservas de COS es fundamental para una planificación efectiva en el manejo sostenible de suelos. El COS es un indicador clave de la salud del suelo y un componente esencial en los ciclos biogeoquímicos, evaluar estas reservas permite implementar prácticas como

la conservación de la materia orgánica y el secuestro de carbono, promoviendo estrategias sostenibles y adaptativas que favorezcan la resiliencia de los ecosistemas (Dalal et al., 2011; Ahmad et al., 2023).

A pesar de cubrir entre el 7 y el 10% de la superficie terrestre, los bosques tropicales tienen un papel fundamental en la regulación climática global, por sus contribuciones a procesos biogeoquímicos esenciales y su alta capacidad de almacenamiento de C. Los bosques tropicales contienen aproximadamente 800 petagramos de carbono (Pg C) combinados entre la vegetación y el suelo, esto representa el 25% del C terrestre sobre y bajo el suelo, casi la misma cantidad de carbono presente en la atmósfera (Poorter et al., 2015; Artaxo et al., 2022). Mientras que, si hablamos solo de COS en los bosques tropicales, se ha encontrado que estos bosques pueden almacenar entre 58 y 123.6 t/ha en los horizontes A y B del suelo hasta los primeros 30 cm de profundidad aproximadamente, con un promedio de 84.9 t/ha (Subashree et al., 2019). Esta cantidad de COS va a variar dependiendo de la región y el tipo de bosque. En los bosques siempre verdes de Brasil se ha encontrado aproximadamente 71,3 PgC en los 100 cm de profundidad del suelo, y los primeros 30 cm contienen casi 36 PgC (Gomes et al., 2019). En los bosques siempreverdes de Colombia, se reportó una concentración de $124,7 \pm 27,9$ t/ha en los primeros 100 cm de suelo (Phillips et al., 2019).

El bosque siempreverde piemontano de la cordillera de los Andes Orientales en Ecuador se encuentra en una franja altitudinal que abarca entre los 400 y 1200 metros sobre el nivel del mar, se caracteriza por su densa vegetación, alta biodiversidad y clima húmedo durante todo el año (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). Además, presenta una alta riqueza florística con especies predominantes como las de las familias Arecaceae, Lauraceae y Moraceae, según estudios realizados en la región del río Piatúa, se destaca la presencia de hasta 68 especies de árboles por hectárea (Patiño et al., 2015). Este ecosistema también cumple un rol fundamental en el almacenamiento de carbono, con registros que oscilan entre 80 y 120 toneladas de COS por hectárea en los primeros 30 cm de profundidad, según el modelo de Moreno

et al., (2017) y *Global Soil Organic Carbon Map (GSOC)* de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2022). encontraron que en los bosques primarios de Colombia el stock de carbono orgánico en suelos de hasta 4 metros de profundidad alcanzan hasta 227,9 t/ha, destacando la importancia de considerar todo el perfil del suelo para evitar subestimaciones en el carbono almacenado. Por otro lado, Morales y Serrano (2019), en un estudio realizado en el bosque siempreverde piemontano cercano a la Reserva Biológica Colonso Chalupas, sin considerar variables topográficas, reportaron un contenido aproximado del 20 % de COS. No obstante, el estudio se limitó a reportar el contenido porcentual, sin calcular su contenido gravimétrico en unidades de masa por superficie, como toneladas por hectárea.

Los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo son moldeados por factores hidrológicos, geomorfológicos, edafológicos y geológicos (Figueroa Jáuregui et al., 2018; Barrezueta-Unda, 2021). Entre los factores naturales se encuentran la pendiente, la temperatura, la precipitación, material parental, las características edáficas, la altitud y la profundidad (Lorenz & Lal, 2005; Pinzon et al., 2018; Shi et al., 2018; Figueroa Jáuregui et al., 2018;). Se ha encontrado que el COS aumenta en el rango de pH de 4.2 a 6.5, alcanzando su punto máximo en un pH de aproximadamente 6.5, luego disminuye rápidamente en el rango de pH de 6.5 a 9.2 (Liao et al., 2016). La textura del suelo tiene una correlación positiva entre el contenido de arcilla y limo y las reservas de COS en el suelo. Los suelos más finos, que tienen un mayor contenido de partículas de arcilla y limo, tienden a retener más COS debido a la mayor superficie específica disponible para la adsorción del carbono orgánico (Zinn et al., 2007).

Por otro lado, los factores antropogénicos, como el manejo y uso del suelo en bosques, tierras de cultivo o pastizales, impactan significativamente la concentración y distribución del COS (Don et al., 2010). Los factores climáticos, como las precipitaciones y la temperatura, tienen mayor influencia en los primeros 20 cm del suelo, mientras que las propiedades edáficas controlan el stock de COS a mayores profundidades (Rial et al., 2017; Luo et al., 2021). La heterogeneidad espacial de las

reservas de carbono orgánico del suelo es controlada por factores ambientales como la textura del suelo, la topografía y el tipo de uso del suelo, destacando que precipitaciones más altas y temperaturas más bajas están asociadas con mayores niveles de carbono orgánico en la mayoría de las regiones (Gonçalves et al., 2021).

La influencia de la altitud influye en el contenido de COS es significativo, donde a mayores altitudes, el COS aumenta debido a la menor actividad microbiana y la reducción en la descomposición de materia orgánica por las bajas temperaturas (Devi, 2021). Este incremento también se observa en suelos destinados a uso agrícola (Kaur et al., 2000). En contraste, en altitudes más bajas, las temperaturas más altas pueden intensificar la respiración del suelo y la descomposición de la materia orgánica, resultando en una mayor pérdida de COS (Okello et al., 2023). Según Li et al. (2022), el contenido de materia orgánica del suelo aumenta con la altitud en regiones tropicales y subtropicales debido a las condiciones climáticas favorables para el secuestro de carbono, mientras que en regiones templadas y de meseta este patrón puede invertirse debido a la menor productividad primaria neta y las condiciones hidrotermales más limitantes. Malla et al. (2022) reportaron que la altitud explica hasta el 58 % de la variabilidad en el contenido de carbono orgánico del suelo en bosques de Nepal, resaltando su importancia como predictor del COS en áreas con amplias variaciones altitudinales.

Por otro lado, Davidson y Janssens (2006) subrayan que las propiedades intrínsecas del suelo, como la textura, el pH y las limitaciones ambientales como los cambios de temperatura, también influyen significativamente en la sensibilidad del carbono del suelo a lo largo de gradientes altitudinales. Sin embargo, estudios como los de Bangroo et al. (2017) y Massaccesi et al. (2020), realizados en un bosque latifoliado y un bosque montano del Himalaya, han obtenido resultados que parecen contradictorios. Estos estudios observaron una disminución del COS con el aumento de la altitud, lo que sugiere un efecto negativo en la estabilización del carbono orgánico y plantea que, en

muchos casos, la influencia de la vegetación puede ser más significativa que la altitud, dependiendo del tipo de bosque.

La pendiente del terreno es otro factor influyente en la cantidad de COS. Este factor está directamente relacionado con la pérdida de suelo, la escorrentía y la densidad aparente, lo que genera cambios en la porosidad y la erosión hídrica, un proceso que remueve la capa superficial del suelo rica en materia orgánica (Gong et al., 2008; Siswo et al., 2023). Esta pérdida de suelo se traduce en una disminución significativa de los contenidos de carbono orgánico, ya que la materia orgánica es arrastrada junto con las partículas del suelo (Lal, 2004). Se ha encontrado que las áreas planas o con pendiente menor a 10° grados de inclinación, tienden a tener mayores reservas de COS en comparación con las pendientes empinadas mayor a 20° (Conforti et al., 2016). Según Chaplot et al., (2009), las pendientes pronunciadas pueden actuar como acumuladores de carbono en las áreas más bajas debido al transporte de material orgánico desde las partes altas, generando un efecto mixto en la redistribución del COS.

Estudios realizados en diferentes paisajes tropicales han mostrado que las pendientes medias presentan una mayor concentración de COS debido a un equilibrio entre la erosión y la deposición de material orgánico (Tumwesigye et al., 2015). La posición de la pendiente también ejerce una influencia en la cantidad de COS. Estudios realizados en países como Estados Unidos, Serbia y China han demostrado que las pendientes orientadas hacia el norte tienden a contener mayores cantidades de COS en comparación con las orientadas hacia el sur. Estas diferencias se atribuyen a la variación en la exposición solar. Las pendientes orientadas al sur reciben mayor insolación directa, lo que eleva las temperaturas y reduce la humedad del suelo, factores que generan condiciones microclimáticas desfavorables para la producción de biomasa y la acumulación de COS (Kunkel et al., 2011;Che et al., 2020;Jakšić et al., 2021). Del mismo modo combinación de factores como el viento y evaporación varía según la orientación (Enescu et al., 2022).

Otro factor que desempeña un papel crucial en la distribución del COS en los ecosistemas tropicales es la profundidad. Investigaciones han demostrado que a medida que aumenta la profundidad del suelo, las reservas de COS disminuyen progresivamente (Kafle, 2019). Sin embargo, estudios realizados en regiones tropicales como la Amazonía brasileña y el sureste de China señalan la importancia de la cantidad de COS que se encuentra en capas más profundas; aproximadamente entre el 50 % y el 60 % del COS se concentra en los primeros 30 cm de profundidad, mientras que el porcentaje restante se distribuye a lo largo del siguiente metro del perfil del suelo (Batjes et al., 1999; Dong et al., 2021).

Según Mulder et al. (2015), los factores que controlan el almacenamiento de carbono en capas profundas difieren de los de las capas superficiales, siendo más influyentes las propiedades físicas como la textura y la capacidad de protección física del suelo. La concentración más alta de COS en los primeros centímetros del suelo se asocia con factores como la precipitación y la humedad, que impactan de manera significativa en la capa superficial del suelo (Acosta-Mireles et al., 2022). Mientras que, en capas más profundas el tipo de suelo y la densidad aparente son factores importantes que afectan el almacenamiento de COS, los suelos con mayor contenido de arcilla y densidad aparente tienden a tener más COS en capas más profundas (Mathieu et al., 2015; Hobbey & Wilson, 2016). Las capas profundas pueden almacenar hasta el 59 % del COS total debido a la mayor estabilidad de la materia orgánica en esas condiciones (Gray et al., 2016).

1.2 Planteamiento de problema

El cambio climático continúa alterando la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, lo que plantea serios desafíos para su gestión sostenible. Comprender las dinámicas del carbono en los bosques es crucial para desarrollar estrategias efectivas que mitiguen estos impactos (Orjuela, 2018; Baveye, 2006). La cuantificación del rol de los bosques como sumideros de carbono depende de diversas variables específicas al

ecosistema y al sitio de estudio. Sin embargo, existe un sesgo significativo hacia el estudio de la biomasa aérea en comparación con el COS, lo que limita nuestra comprensión integral de estos sistemas. Este desequilibrio es evidente en los proyectos de secuestro de carbono, donde la biomasa aérea es el componente más investigado (Galicía et al., 2016; Casiano-Domínguez et al., 2018; Chan et al., 2022).

Además, la investigación sobre el COS frecuentemente se restringe a las capas superficiales del suelo. En un análisis de 360 estudios sobre los efectos del uso del suelo en el COS, el 90% de ellos muestrearon hasta 30 cm de profundidad o menos, y el 50% se limitaron a 15 cm o menos (Mobley et al., 2014; Richter & Billings, 2015). En un metaanálisis sobre el impacto de la cosecha en el carbono del suelo forestal, solo el 2% de los 112 estudios considerados incluyeron mediciones a profundidades de 60 cm o más (James & Harrison, 2016). Estas investigaciones explican que los estudios a mayores profundidades es menos común debido a estándares internacionales de monitoreo, la dificultad y costos del muestreo en profundidad, y la percepción errónea de que el carbono profundo es estable. Además mencionan, que la alta variabilidad espacial y temporal del carbono en capas profundas hace que su estudio sea más complejo y menos frecuente. Este enfoque limitado subestima la importancia de las capas más profundas del suelo en el almacenamiento de carbono.

Adicionalmente, en los ecosistemas tropicales, la información sobre cómo varía el almacenamiento de carbono en función a factores topográficos y gradientes altitudinales es escasa (Raich et al., 2006; Dieleman et al., 2013; De la Cruz-Amo et al., 2020). Aunque algunos estudios han encontrado un aumento del carbono orgánico del suelo con la altitud, otros no han identificado un patrón claro, lo que resalta la necesidad de más investigaciones en este ámbito (Soethe et al., 2007; Zimmermann et al., 2010; Phillips et al., 2019). Para comprender plenamente el papel de los bosques como sumideros de carbono, es fundamental abordar el carbono orgánico del suelo, considerando de manera integrada los factores bióticos y abióticos que los determinan.

1.3 Justificación de la investigación

Este estudio ofrece una oportunidad para contribuir a la mitigación del cambio climático al comprender el efecto de factores físicos sobre el secuestro de COS, un elemento crucial en la lucha contra el calentamiento global (Orjuela, 2018). El COS es un indicador clave para monitorear la degradación de suelos y tierras, siendo esencial para alcanzar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la alimentación, la salud, el agua, el clima y la gestión de la tierra (Lorenz et al., 2019). En particular, el COS está contemplado en el subindicador 15.3.1 del ODS 15 "Vida de ecosistemas terrestres" (Bogdanets & Nosenko, 2022) facilitando el diseño de modelos y estrategias de manejo sostenible que promuevan la conservación de la biodiversidad y mejoren nuestra capacidad de respuesta ante el cambio climático (Burbano Orjuela, 2016). Una de las principales iniciativas de mitigación es "4 per 1000", que busca incrementar anualmente en un 0,4 % las reservas de COS (Soussana et al., 2017). Además, el "Global Soil Organic Carbon Map" (GSOCmap), desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), utiliza datos globales de múltiples países para ofrecer una representación de la distribución del COS, apoyando los esfuerzos internacionales para mitigar el cambio climático (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

Ecuador contribuyó a este modelo mediante la medición del contenido de COS en los primeros 30 cm de suelo a nivel nacional, identificando los factores ambientales que afectan su almacenamiento, así como las covariables que generan incertidumbre en su cuantificación. Sin embargo, este mismo estudio permitió identificar las áreas con menor información sobre el COS y los factores que influyen en su almacenamiento. Las zonas con menos información fueron las Islas Galápagos, la provincia de Esmeraldas y la Amazonía ecuatoriana. El estudio destacó que solo a través de la mejora de esta información se podrá evaluar con mayor precisión las reservas de COS y perfeccionar los modelos predictivos (Loayza et al., 2020).

En este contexto, esta investigación resulta crucial porque aborda una brecha de información identificada a nivel nacional en Ecuador sobre el almacenamiento de COS en regiones con baja disponibilidad de datos, como la Amazonía ecuatoriana. Específicamente, esta investigación calcula el COS en función de la altitud y la pendiente, dos factores topográficos que han sido poco explorados en la variabilidad del carbono del suelo en ecosistemas tropicales. COS es un componente clave para la mitigación del cambio climático, este estudio contribuirá a mejorar la precisión de los modelos de carbono y fortalecerá estrategias de conservación y manejo sostenible en esta región. Además, al centrarse en un ecosistema con alto potencial de secuestro de carbono pero con datos limitados, esta investigación puede proporcionar información valiosa para futuras políticas ambientales y la implementación de iniciativas globales como "4 per 1000" y el GSOCmap de la FAO.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 General

Evaluar el contenido de carbono orgánico del suelo en el perfil vertical hasta un metro de profundidad, considerando los efectos de la altitud y la pendiente, en dos parcelas de la Universidad Regional Amazónica IKIAM, ubicadas cerca de la Reserva Biológica Colonso Chalupas, en el sector de Alto Tena, Tena, Ecuador.

1.4.2 Específicos

- Cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo (t/ha) en cinco estratos de profundidad dentro del perfil de un metro en el Bosque Siempreverde Piemontano del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes.
- Determinar la relación entre la altitud y pendiente con la distribución vertical del carbono orgánico del suelo .

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo en dos parcelas pertenecientes a la Universidad Regional Amazónica IKIAM, ubicadas cerca de la Reserva Biológica Colonso Chalupas, en el sector de Alto Tena, Tena, Ecuador. En el ecosistema clasificado como bosque siempreverde piemontano de la Cordillera Oriental Norte de los Andes, según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). El muestreo se realizó en 12 subparcelas de 10 x 10 dentro de las dos parcelas de una hectárea previamente delimitadas por la Universidad Regional Amazónica IKIAM para monitoreo e investigación. La primera parcela está ubicada a 950 m s.n.m. (coordenadas: 0°56'32.8"S, 77°53'44.9"W) y la segunda a 550 m s.n.m. (coordenadas: 0°56'52.2"S, 77°52'08.4"W) (Figura 1).

Las muestras de suelo se recolectaron en áreas con pendientes superiores a 30 grados de inclinación y en otras con pendientes inferiores a 10 grados. La orientación de la pendiente fue hacia el noreste, para evitar variaciones en los datos (Kunkel et al., 2011;

Che et al., 2020 ; Jakšić et al., 2021). La zona presenta un clima tropical lluvioso, con una disminución de las precipitaciones entre los meses de septiembre y noviembre, considerados los más secos, el pH del suelo es ácido, la temperatura media anual es de 21.7 °C, con una precipitación promedio anual de 3832 mm y una humedad relativa superior al 60% (Ministerio del Ambiente del Ecuador & Subsecretaría de Patrimonio Natural., 2013; Clima Provincia de Napo: Climograma, Temperatura y Tabla Climática para Provincia de Napo, 2021).

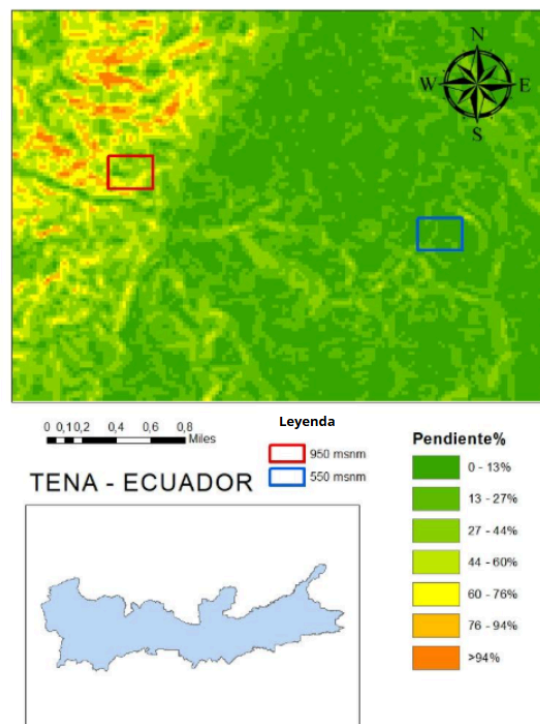


Figura 1. Área de estudio con porcentaje de pendiente calculado a través de un DEM generado en el software ArcMap 10.7. El rectángulo rojo representa la parcela a 950 m s.n.m. y rectángulo azul la parcela a 550 m s.n.m.

2.2 Criterios de selección y cálculo de altitud y pendiente.

Se seleccionaron las altitudes de 550 m s.n.m. y 950 m s.n.m. para evaluar la variación del COS en el bosque siempreverde piemontano nororiental de la cordillera de los Andes. Según la clasificación de ecosistemas terrestres del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), este ecosistema se encuentra entre los 400 y

1200 m s.n.m. Las altitudes seleccionadas se encuentran dentro de esta franja altitudinal, evitando transiciones a otros tipos de ecosistemas. Se empleó un GPS para obtener las coordenadas geográficas y la altitud de los puntos de muestreo (Mendoza & Espinoza, 2017)

Para la realización de esta investigación se usó dos parcelas previamente delimitadas por la Universidad Regional Amazónica IKIAM en este tipo de bosque, ubicadas en las altitudes seleccionadas: una a 550 m s.n.m. y otra a 950 m s.n.m. para monitoreo e investigación. En estas parcelas se midió el pH y la humedad en los meses de la toma de muestras (septiembre y octubre) con un pHmetro y se obtuvo un pH de 6 y una humedad del 50% en ambas parcelas. Estas parcelas aseguraron la viabilidad del muestreo, el acceso al sitio y tienen pendientes que cumplen con el grado de inclinación necesarios para la comparación y análisis de datos.

Para la caracterización de la pendiente en las áreas de estudio, se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de pendiente generado en el software ArcMap 10.7 (Esri, 2019). Este análisis proporcionó una visión general de la distribución de las pendientes en la zona (Figura 2), permitiendo identificar áreas potenciales para el muestreo. Sin embargo, la pendiente en cada punto de muestreo fue medida directamente en campo mediante un clinómetro, asegurando mayor precisión. Para cada sitio, se establecieron puntos de referencia (A y B) a una altura de 1 metro, y se determinó la inclinación midiendo el ángulo entre ambos puntos. Se seleccionaron las pendientes que cumplieran con los criterios establecidos para pendientes suaves (5-12% o $<10^\circ$) y pendientes fuertes (40-70% o $>30^\circ$) según la clasificación del MAGAP-CLIRSEN (2011).

2.3 Diseño experimental

2.3.1 Diseño bifactorial de dos niveles

Las parcelas de estudio están ubicadas dentro del mismo ecosistema, identificado como bosque siempreverde nororiental de los Andes según el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), por lo cual comparten características de suelo similares. El material parental de esta zona de estudio es (QA - Aluviones), compuesto por arcillas y arenas según el Instituto Geológico y Minero del Ecuador (INIGEMM). Esta homogeneidad geológica sugiere que las propiedades básicas del suelo deberían ser similares en ambos sitios. Por esta razón, la presente investigación se centra en analizar los efectos de la altitud y la pendiente en la distribución del COS, asumiendo que el material parental no introduce variabilidad significativa en este contexto descartando así el factor de tipo de material geológico para el diseño factorial.

Por lo tanto, para determinar la cantidad de puntos de muestreo y cantidad de muestras necesarias, se estableció un diseño experimental bifactorial de dos niveles basado en un diseño completamente al azar.

Primero se definieron los factores y sus niveles de la siguiente manera:

Factor 1: Pendiente

- Nivel 1 (α_1): Pendiente $> 30^\circ$ de inclinación
- Nivel 2 (α_2): Pendiente $< 10^\circ$ de inclinación

Factor 2: Altitud

- Nivel 1 (β_1): 550 m s.n.m.
- Nivel 2 (β_2): 950 m s.n.m.

Posteriormente, se identificaron las combinaciones posibles entre los factores. Estas combinaciones se organizan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tratamientos resultantes a partir de los 2 factores y 2 niveles definidos

Pendiente \ Altitud	550 m s.n.m. (β_1)	950 m s.n.m. (β_2)
Pendiente < 10° (α_1)	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Pendiente > 30° (α_2)	Tratamiento 3	Tratamiento 4

Los 4 tratamientos resultantes son:

Tratamiento 1: Pendiente < 10° y 550 m s.n.m. (combinación de α_1 y β_1)

Tratamiento 2: Pendiente < 10° y 950 m s.n.m. (combinación de α_1 y β_2)

Tratamiento 3: Pendiente > 30% y 550 m s.n.m. (combinación de α_2 y β_1)

Tratamiento 4: Pendiente > 30% y 950 m s.n.m. (combinación de α_2 y β_2)

2.3.2 Repeticiones y distribución

Para mejorar la precisión y reducir el error experimental, se incluyeron 3 repeticiones por combinación de tratamiento, resultando en un total de 12 subparcelas de muestreo (4 tratamientos $\times$ 3 repeticiones). La distribución de las muestras es la siguiente:

Parcela a 550 m s.n.m.: 6 subparcelas de muestreo (3 en pendientes < 10° y 3 en pendientes > 30°).

Parcela a 950 m s.n.m.: 6 subparcelas de muestreo con la misma distribución de pendientes.

2.3.3 Diseño al azar

Para determinar la ubicación de las 12 subparcelas se estableció un diseño al azar (Gobierno de Chile, 2015). Esto implica que se generaron puntos aleatorios (100

puntos) dentro de las dos parcelas de estudio (ubicadas a 550 msnm y 950 msnm) utilizando el software ArcGIS (Figura 2). No se estableció ninguna restricción en la distancia entre puntos. Los puntos aleatorios permitieron identificar áreas potenciales para el muestreo a través del DEM de pendiente software ArcMap 10.7 y fueron una guía para las zonas de muestreo, sin embargo en campo se identificó las subparcelas que cumplan los criterios de pendiente (pendientes suaves y pendientes fuertes) y que sean accesibles para la toma de la muestra. La Figura 3 muestra la ubicación de las 12 subparcelas, distribuidas en dos altitudes: seis a 550 m s.n.m. y seis a 950 m s.n.m. En cada altitud, tres subparcelas corresponden a pendientes suaves y pendientes fuertes.

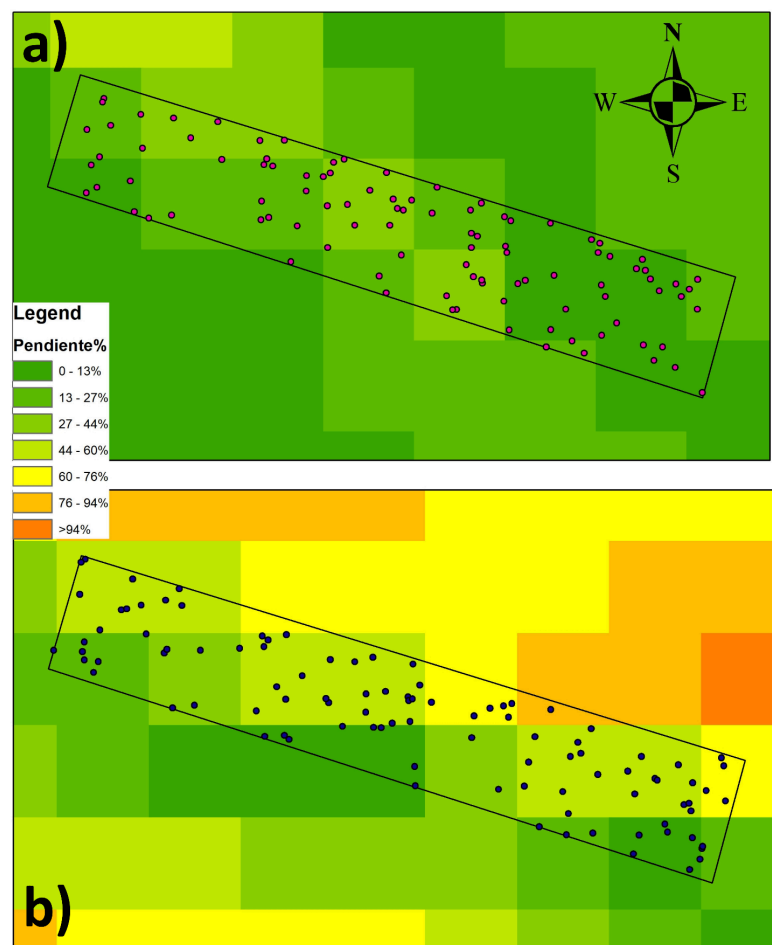


Figura 2. Puntos aleatorios generados por el software arcmap versión 10.7. a) parcela a 550 m s.n.m. b) parcela a 950 m s.n.m.

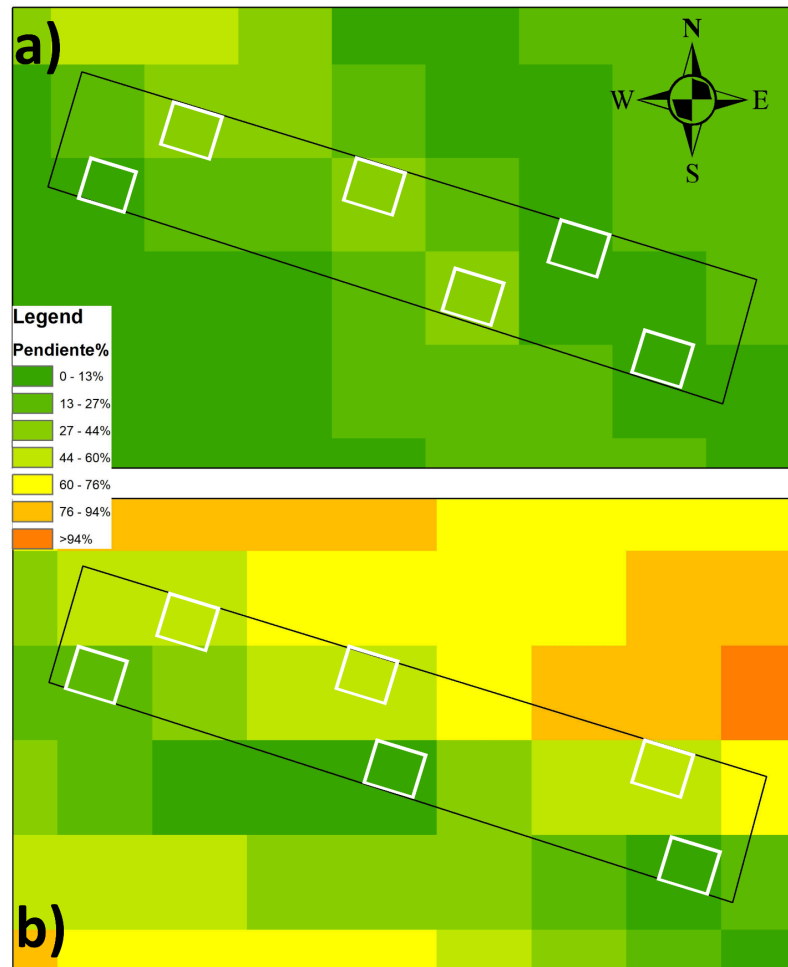


Figura 3. Selección de las 12 subparcelas. 6 subparcelas a 550 m s.n.m. (3 a pendiente <10° grados y 3 a pendiente >30°). b) 6 subparcelas a 950 m s.n.m. (3 a pendiente <10° grados y 3 a pendiente >30°).

2.4 Muestreo por profundidad

En cada uno de estos 12 puntos de muestreo, se recolectaron muestras de suelo en intervalos de 20 cm desde la superficie hasta un metro de profundidad: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm y 80-100 cm. Esto generará un total de 5 muestras por punto, resultando en un total final de 60 muestras de suelo (12 puntos de muestreo × 5 submuestras por punto).

2.5 Muestreo de suelo

Para la toma de muestras, se utilizó la metodología especificada en instructivos de recolección de muestras para análisis de suelos (Agrocalidad, 2018; Gobierno de Chile, 2015; Mendoza & Espinoza, 2017). Las subparcelas de muestreo, son cuadradas de dimensiones 10 x 10, en cada subparcela con un barreno se recolectó una muestra compuesta formada por cinco submuestras dentro de esta. Cuatro muestras fueron recolectadas en las esquinas de y una en el centro de la subparcela, formando una “x”. Estas submuestras fueron homogeneizadas para obtener 1 sola muestra de aproximadamente 1kg (Figura 4). Esto para los 5 intervalos previamente mencionados hasta un metro (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm y 80-100 cm).

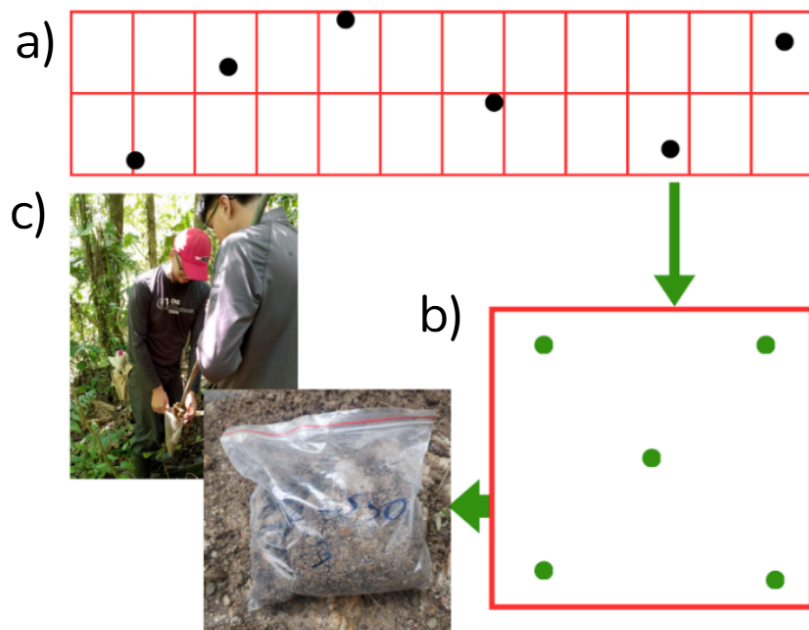


Figura 4. En a) se representa toda la parcela y los puntos seleccionados de muestreo. En b) se representa de donde se toman las 5 submuestras en cada subparcela. En c) se indica la muestra compuesta de 1 kg a partir de las 5 muestras compuestas.

2.6 Muestreo y cálculo de densidad aparente.

La densidad aparente se muestreo y cálculo mediante el método del cilindro de acuerdo con De los Ángeles Agostini et al. (2014). Se realizó un hoyo con una pala a un metro de profundidad, se introdujo un cilindro metálico de dimensiones de 5 cm de alto y 5 cm de diámetro en el suelo en los cinco diferentes intervalos de profundidad (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm y 80-100 cm). Posteriormente, el cilindro fue extraído con la muestra y enrasada para eliminar el exceso de suelo. Finalmente la muestra se secó en una estufa a 105 °C durante 48 horas, para posteriormente pesarla. La densidad aparente se obtuvo de cuatro subparcelas una por cada tratamiento (4 diferentes tratamientos), se utilizó la misma densidad aparente para las repeticiones de cada tratamiento. Obtenido los datos de peso se utilizó la siguiente fórmula para volumen del cilindro:

$$V = \pi * r^2 * h$$

Ecuación (1)

Y para la densidad aparente:

$$\delta = \frac{m_{\text{suelo con cilindro}} - m_{\text{cilindro}}}{V}$$

Ecuación (2)

2.7 Análisis de Laboratorio

En la fase de laboratorio, el COS de las 60 muestras se determinó mediante el método de calcinación, siguiendo el protocolo descrito por Bautista & Hernández (2021). Primero, se secó el suelo en un deshidratador a una temperatura de 40 ± 5 °C durante tres días, hasta que la variación en su peso fue inferior al 5%. En el suelo seco se formaron aglomerados, así que previo a tamizar el suelo se utilizó un mortero para disgregarlo. Posteriormente, el suelo fue tamizado con un tamiz de malla <2 mm para

eliminar clastos, raíces y vegetación, para obtener solo las partículas finas de suelo. Se pesó 10 g de suelo previamente seco y tamizado ($<2\text{mm}$) en un crisoles, los cuales se colocan en una estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, registrándose su peso una vez completado el proceso. Finalmente la muestra resultante se sometió al proceso de calcinación en una mufla a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, tras lo cual se registra nuevamente su peso para el cálculo del COS (Figura 5).



Figura 5. Fase de laboratorio. En a), se observa el proceso de secado del suelo en un deshidratador. En b), el suelo seco es tamizado con un tamiz de malla $<2\text{ mm}$ para obtener las partículas finas de suelo. En c), 10 g de suelo seco y tamizado en crisoles, se colocan en una estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. En d), la muestra se coloca en la mufla y se observa posteriormente la toma de los pesos de la muestra.

Después de obtener los valores del suelo seco y calcinado se aplicaron las fórmulas estandarizadas para calcular el COS. Según el método de Bautista y Hernández (2021), el cálculo del COS requiere primero determinar la materia orgánica y la densidad aparente. Para calcular la materia orgánica, se utilizó la ecuación según Zagal & Sadzawka (2007), mientras que para la densidad aparente se empleó el método del cilindro, de acuerdo con De los Ángeles Agostini et. al. (2014).

La fórmula para calcular el porcentaje de materia orgánica según según Zagal & Sadzawka (2007) es la siguiente:

$$materia\ orgánica(\%) = \frac{d-b}{d-c} * 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

b= masa en gramos del residuo de calcinación + recipiente.

c = masa del recipiente.

d = masa en gramos del suelo seco a 105°C ± 5°C + recipiente.

Finalmente, para determinar el COS, se calculó utilizando la siguiente fórmula para el porcentaje de carbono orgánico según Bautista & Hernández (2021).

Cálculo del porcentaje de carbono orgánico (%OC):

$$\%OC = \frac{\%OM}{1,724 \rightarrow \text{Factor de Van Bernelen}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$o \quad \%OC = \%OM(0,58) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Y cálculo de Carbono Orgánico del Suelo:

$$COS(t/ha) = \%OC/100 * (Da) * P \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

%OC = % total de carbono orgánico

Da= Densidad aparente (g/cm³)

P= Profundidad del suelo (cm³)

2.8 Análisis estadísticos

2.8.1 Pruebas de supuestos

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk se aplicó para determinar si los datos seguían una distribución normal (R Core Team, 2023). Asimismo, la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene se utilizó para verificar si las varianzas entre las categorías de altitud y pendiente eran homogéneas (Fox & Weisberg, 2019).

2.8.2 Análisis de la varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza de dos factores (ANOVA) se empleó para evaluar el efecto de la altitud, la pendiente y su interacción sobre el contenido de COS. Este análisis permitió identificar si existían diferencias significativas entre los niveles de estas variables. Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey para determinar entre qué combinaciones de altitud y pendiente se encontraban diferencias significativas. Además, se realizó la prueba de Tukey para comparar los cuatro tratamientos establecidos (Pendiente < 10° y 550 m s.n.m.; Pendiente < 10° y 950 m s.n.m.; Pendiente > 30% y 550 m s.n.m.; Pendiente > 30% y 950 m s.n.m.) (R Core Team, 2023).

2.8.3 Análisis de correlación

Se utilizó una matriz de correlación de Pearson para analizar y explorar la fuerza y dirección de la relación entre el COS y variables edáficas como altitud, pendiente, profundidad, porcentaje de materia orgánica (%MO) y densidad aparente (R Core Team, 2023; Kassambara, 2019).

2.8.4 Regresión lineal múltiple

Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para cuantificar la influencia de diversas variables independientes (altitud, pendiente, profundidad, DA y %MO) en el contenido de COS. Previamente, se realizó un análisis de multicolinealidad para eliminar variables altamente correlacionadas, garantizando la estabilidad del modelo. Este análisis permitió estimar el efecto de cada variable sobre el COS, manteniendo las demás constantes (Fox & Weisberg, 2019).

2.8.5 Análisis descriptivo

Se emplearon gráficos boxplot para visualizar la distribución del COS según las combinaciones de altitud, pendiente y sus interacciones. Estos gráficos permitieron analizar la dispersión, tendencia central y la presencia de valores atípicos en los datos (Wickham, 2016).

Capítulo III RESULTADOS

3.1 Distribución vertical del contenido de COS a un metro de profundidad bajo diferente altitud y pendiente

La distribución del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) a un metro de profundidad varió significativamente según las combinaciones de altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente ($<10^\circ$ y $>30^\circ$) evaluadas (Tabla 2) (Figura 6). En general, se observó una disminución progresiva del contenido de COS con la profundidad en todas las combinaciones de altitud y pendiente. Los valores más altos de COS se registraron en suelos ubicados a 950 m s.n.m. con pendientes mayores a 30° , particularmente en las capas superficiales (0-20 cm). Por otro lado, los valores más bajos de COS se encontraron en suelos a 550 m s.n.m. con pendientes menores a 10° , especialmente en las capas más profundas (80-100 cm). El contenido de materia orgánica (%MO) se mantuvo relativamente constante entre las pendientes evaluadas a una misma altitud, tanto en 550 m s.n.m. como en 950 m s.n.m. Asimismo, la densidad aparente (DA) mostró un aumento progresivo con la profundidad, independientemente de la combinación de altitud y pendiente, alcanzando valores máximos en las capas más profundas (80-100 cm). El contenido de carbono en la capa superficial (0-20 cm) varió entre el 26 al 31% de COS mientras que en las capas más profundas se encontró entre el 69 al 74% de COS.

Tabla 2. Media $\pm$ error estándar de variables edáficas bajo diferentes combinaciones de altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente ($<10^\circ$ y $>30^\circ$).

a) Distribucion vertical a 1 metro de variables edaficas en 550msnm - $<10^\circ$ de pendiente

Profundidad	%MO	Densidad Aparente	%CO	COS t/ha
20	12.03 $\pm$ 0.43	0.45 $\pm$ 0.00	6.98 $\pm$ 0.25	63.38 $\pm$ 2.28
40	7.86 $\pm$ 0.51	0.52 $\pm$ 0.00	4.56 $\pm$ 0.29	47.76 $\pm$ 3.08
60	6.46 $\pm$ 1.22	0.54 $\pm$ 0.00	3.74 $\pm$ 0.71	40.19 $\pm$ 7.58
80	4.86 $\pm$ 0.71	0.54 $\pm$ 0.00	2.82 $\pm$ 0.41	30.42 $\pm$ 4.42
100	3.49 $\pm$ 1.44	0.56 $\pm$ 0.00	2.03 $\pm$ 0.83	22.74 $\pm$ 9.35

b) Distribucion vertical a 1 metro de variables edaficas en 550msnm - $>30^\circ$ de pendiente

Profundidad	%MO	Densidad Aparente	%CO	COS t/ha
20	13.17 $\pm$ 0.13	0.57 $\pm$ 0.00	7.64 $\pm$ 0.08	87.73 $\pm$ 0.86
40	8.13 $\pm$ 0.83	0.80 $\pm$ 0.00	4.72 $\pm$ 0.48	75.48 $\pm$ 7.60
60	7.07 $\pm$ 0.94	0.80 $\pm$ 0.00	4.10 $\pm$ 0.55	65.39 $\pm$ 8.83
80	5.76 $\pm$ 1.07	1.00 $\pm$ 0.00	3.34 $\pm$ 0.62	66.68 $\pm$ 12.38
100	2.86 $\pm$ 1.60	1.02 $\pm$ 0.00	1.66 $\pm$ 0.93	33.71 $\pm$ 18.87

c) Distribucion vertical a 1 metro de variables edaficas en 950msnm - $<10^\circ$ de pendiente

Profundidad	%MO	Densidad Aparente	%CO	COS t/ha
20	16.89 $\pm$ 0.23	0.64 $\pm$ 0.00	9.80 $\pm$ 0.14	126.01 $\pm$ 1.74
40	12.98 $\pm$ 1.41	0.66 $\pm$ 0.00	7.53 $\pm$ 0.82	98.85 $\pm$ 10.75
60	9.51 $\pm$ 0.42	0.80 $\pm$ 0.00	5.52 $\pm$ 0.25	88.35 $\pm$ 3.93
80	7.31 $\pm$ 0.34	1.03 $\pm$ 0.00	4.24 $\pm$ 0.20	86.90 $\pm$ 4.05
100	6.07 $\pm$ 0.16	1.07 $\pm$ 0.00	3.52 $\pm$ 0.09	75.60 $\pm$ 1.95

d) Distribucion vertical a 1 metro de variables edaficas en 950msnm - $>30^\circ$ de pendiente

Profundidad	%MO	Densidad Aparente	%CO	COS t/ha
20	15.63 $\pm$ 0.20	0.78 $\pm$ 0.00	9.07 $\pm$ 0.11	141.33 $\pm$ 1.76
40	11.85 $\pm$ 0.23	0.82 $\pm$ 0.00	6.87 $\pm$ 0.13	112.65 $\pm$ 2.20
60	9.75 $\pm$ 0.64	0.88 $\pm$ 0.00	5.66 $\pm$ 0.37	99.80 $\pm$ 6.51
80	8.40 $\pm$ 0.16	0.94 $\pm$ 0.02	4.87 $\pm$ 0.09	91.50 $\pm$ 3.06
100	7.02 $\pm$ 0.04	0.92 $\pm$ 0.02	4.07 $\pm$ 0.02	75.07 $\pm$ 0.90

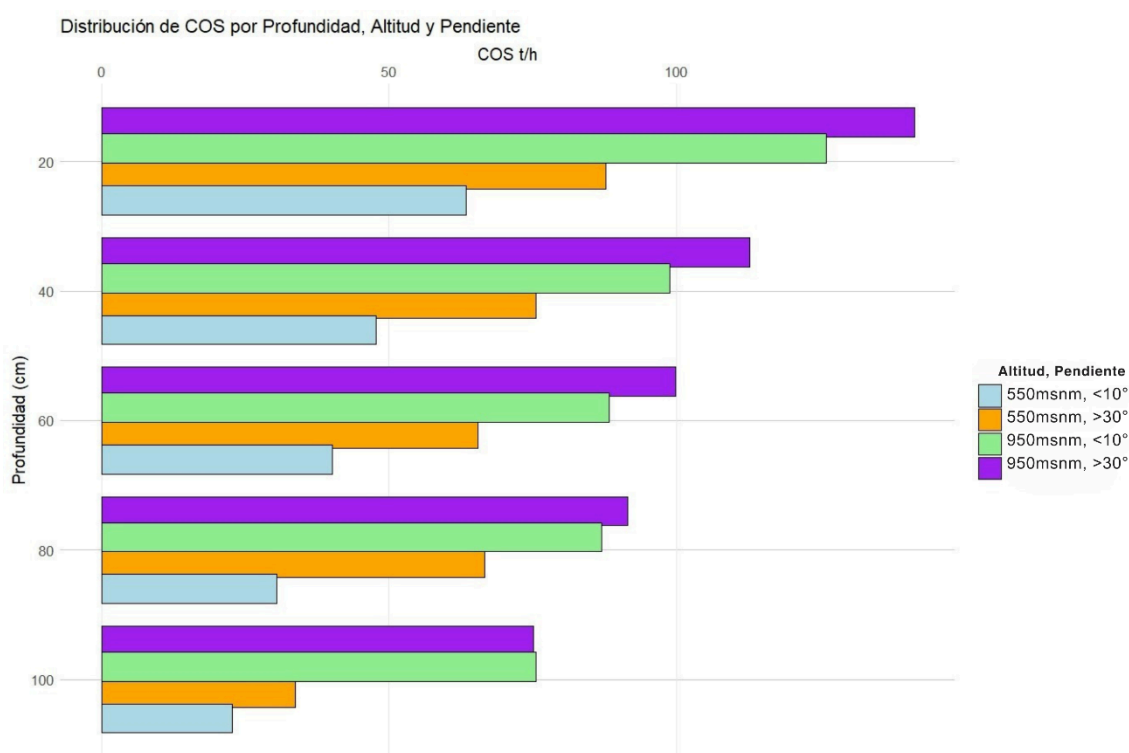


Figura 6. Distribución vertical del contenido de carbono orgánico del suelo (COS). COS (t/ha) a un metro de profundidad con intervalos de 20 cm, bajo diferentes combinaciones de altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente ($<10^\circ$ y $>30^\circ$).

La Tabla 3 presenta el porcentaje de Carbono Orgánico del Suelo (COS) en dos capas de profundidad (0-20 cm y 20-100 cm) bajo cuatro combinaciones de altitud y pendiente. A 550 m s.n.m., en pendientes <10°, el 31% del COS se encuentra en la capa superficial y el 69% en las capas profundas, mientras que en pendientes >30°, el COS superficial disminuye al 27% y aumenta al 73% en las capas profundas. A 950 m s.n.m., en pendientes <10°, el COS superficial es del 26% y el profundo del 74%, con valores similares en pendientes >30° (27% y 73%, respectivamente) (Figura 7).

Tabla 3. Porcentaje de COS en la capa superior (0-20 cm) y en la capa más profunda (20 - 80).

Pendiente-Altitud	0-20 cm	20-100 cm
550 m s.n.m., <10°	31%	69%
550 m s.n.m., >30°	27%	73%
950 m s.n.m., <10°	26%	74%
950 m s.n.m., >30°	27%	73%

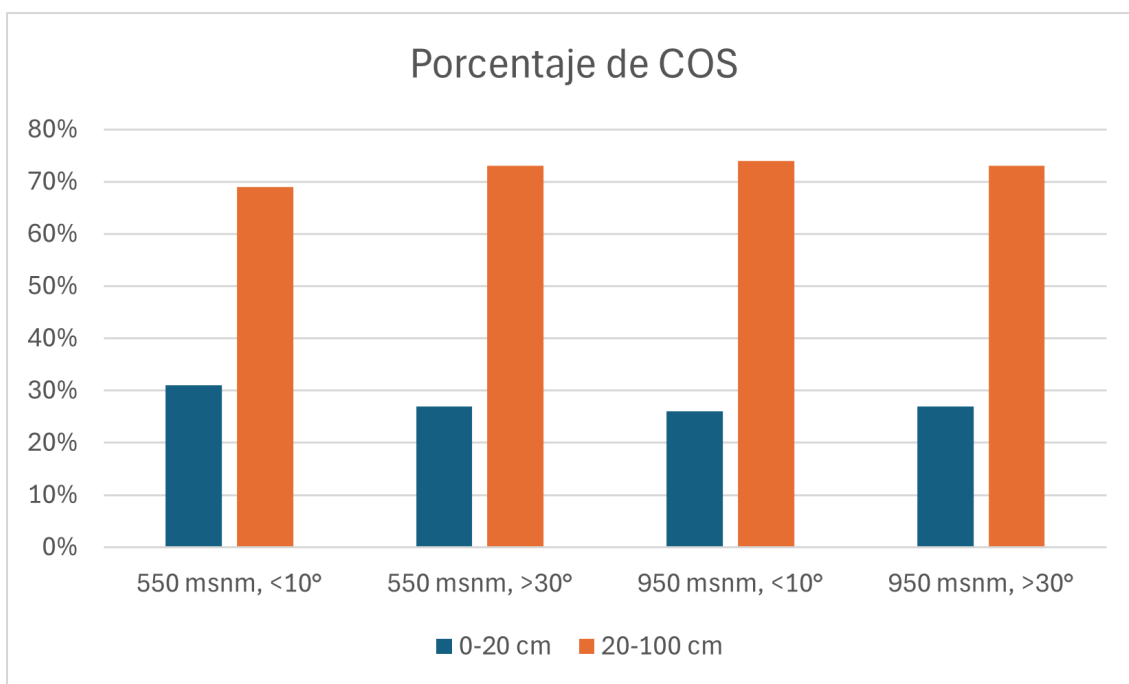


Figura 7. Porcentaje de COS en la capa superior (0-20 cm) y en la capa más profunda (20 - 80). En el eje X se observan las cuatro diferentes combinaciones de altitud y pendiente estudiadas. En el eje Y se observa el porcentaje de pendiente.

3.2 Contenido total de COS a un metro de profundidad

El contenido total de carbono orgánico del suelo (COS) a un metro de profundidad mostró diferencias significativas según las combinaciones de altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente (<10° y >30°) evaluadas (Tabla 4). Los valores más altos de COS se registraron en suelos ubicados a 950 m s.n.m. con pendientes mayores a 30°, alcanzando un promedio de 520.35 ± 7.78 t/ha. En contraste, los valores más bajos se observaron en suelos a 550 m s.n.m. con pendientes menores a 10°, con un promedio de 204.48 ± 13.38 t/ha.

A 550 m s.n.m., el contenido de COS fue menor en ambas pendientes, aunque los suelos con pendientes >30° presentaron un incremento significativo en comparación con las pendientes <10° (328.99 ± 25.41 t/ha frente a 204.48 ± 13.38 t/ha). De manera similar, a 950 m s.n.m. se observó un mayor contenido de COS en pendientes >30° (520.35 ± 7.78 t/ha) en comparación con pendientes <10° (475.71 ± 12.42 t/ha).

Tabla 4. COS (t/ha) total a un metro de profundidad bajo diferente pendiente y altitud

Altitud	Pendiente	COS t/ha
550 m s.n.m.	<10° de pendiente	204.48±13.38
550 m s.n.m.	>30° de pendiente	328.99±25.41
950 m s.n.m.	<10° de pendiente	475.71±12.42
950 m s.n.m.	>30° de pendiente	520.35±7.78

3.3 Efecto de la pendiente y altitud sobre el contenido de COS

3.3.1 Análisis ANOVA

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk indicó $p=0.449$, mientras que la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene indicó $p=0.398$ para altitud y $p=0.292$ para pendiente. Estos valores confirman el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, permitiendo el análisis ANOVA.

El análisis ANOVA mostró $p=0.0038$ para pendiente ($F=9.123$) y $p=2.55 \times 10^{-11}$ para altitud ($F=68.230$), indicando que ambos factores tienen un impacto significativo en el contenido de COS. El contenido de COS aumenta con la altitud y la pendiente (Figura 8). Sin embargo, el impacto de la altitud es considerablemente más pronunciado, como lo evidencia su mayor valor F en comparación con la pendiente.

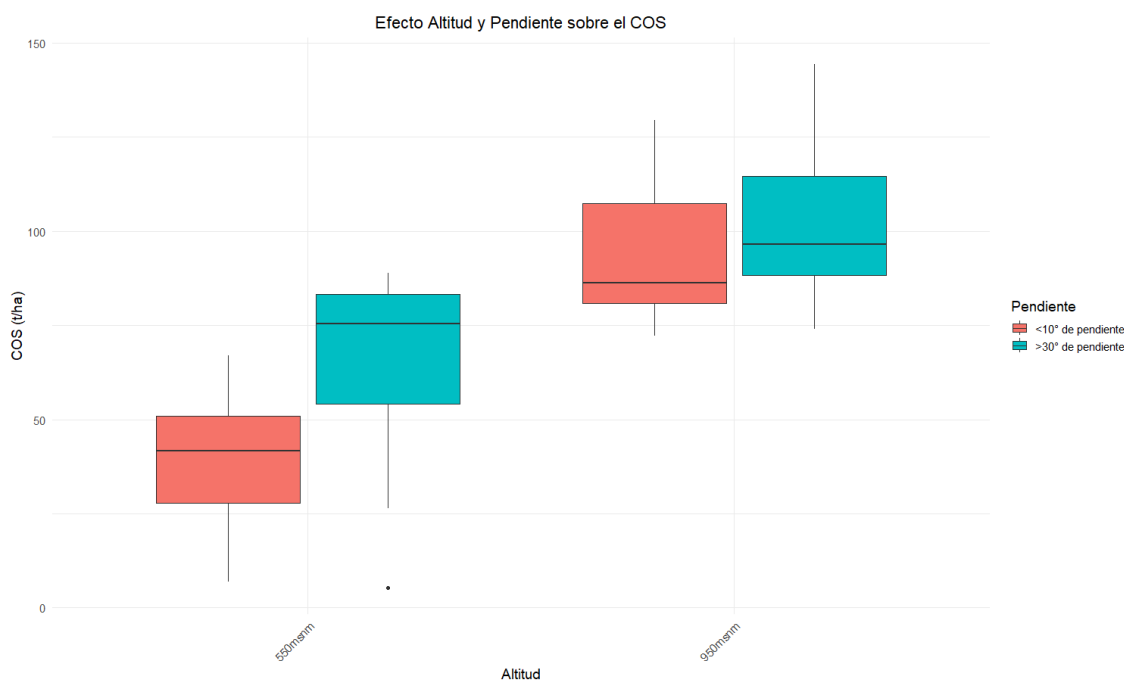


Figura 8. Efecto de la altitud (550 m s.n.m. y 950 m s.n.m.) y pendiente (<10° y >30°) sobre el contenido de carbono orgánico del suelo (COS, t/ha). En el eje X se presentan las categorías de altitud y pendiente, mientras que en el eje Y se muestra el contenido de COS en t/ha.

3.3.2 Análisis post hoc de TUKEY

El análisis post hoc de Tukey encontró para la variable pendiente una diferencia significativa en el COS entre las pendientes mayores a 30° y menores a 10° (diff = 16.92 t/ha, IC95%: 5.80 – 28.03, p-adj = 0.003). Para la variable altitud el análisis de Tukey observó una diferencia altamente significativa en el COS entre los 950 m s.n.m. y 550 m s.n.m. (diff = 46.26 t/ha, IC95%: 35.14 – 57.37, p-adj =< 0.001). Esto evidencia que la altitud influye considerablemente en la distribución del carbono orgánico en el suelo, con mayores contenidos a mayor altitud.

Mientras que el análisis post hoc de Tukey para la interacción entre pendiente y altitud identificó que las posibles combinaciones son significativas a excepción de la comparación entre pendiente>30°;950 m s.n.m. vs. Pendiente <10°;950 m s.n.m. que no es significativa (diff = 8.93 t/ha, IC95%: -11.84 – 29.70, p-adj = 0.67) (Figura 9).

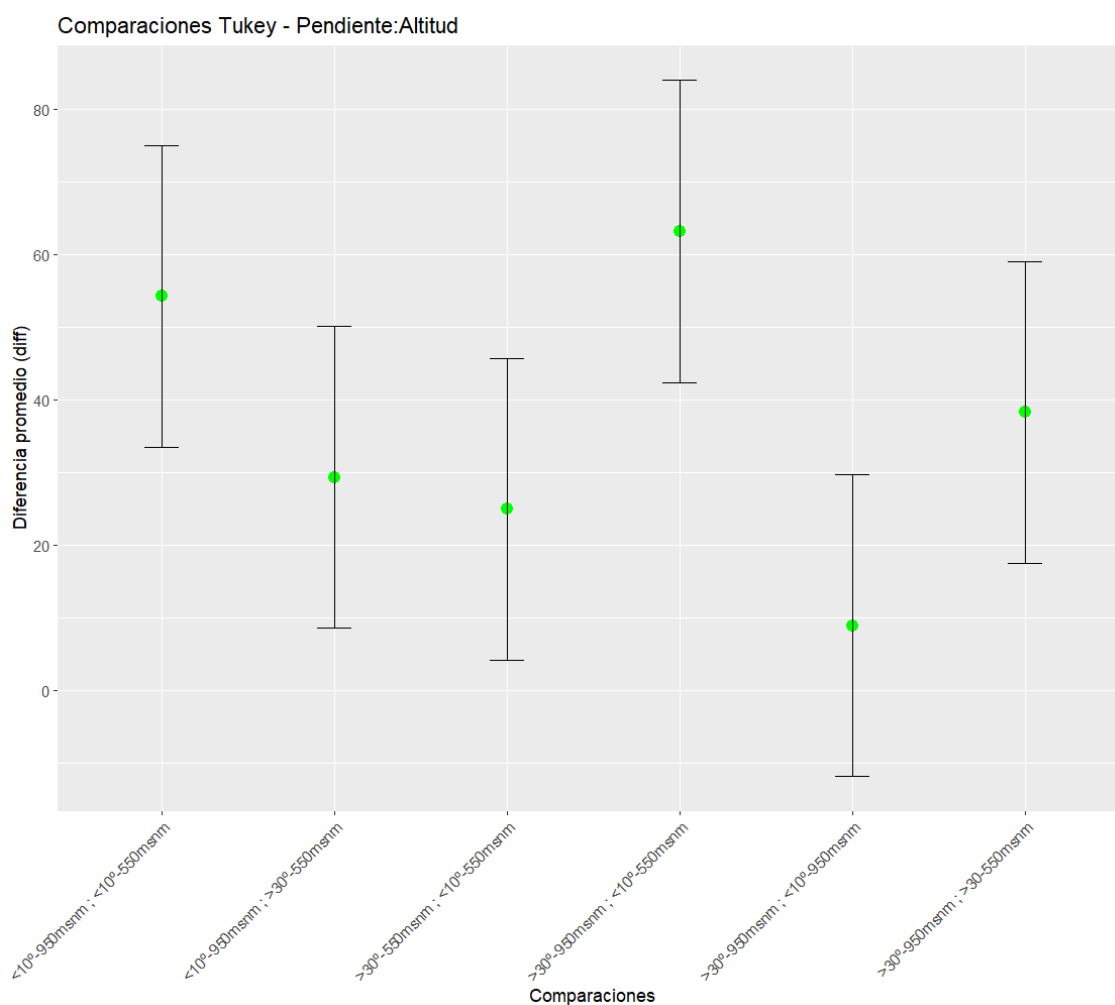


Figura 9. Comparaciones post hoc de Tukey para las interacciones entre pendiente y altitud con intervalos de confianza al 95% para las comparaciones múltiples entre combinaciones. Los puntos representan las diferencias promedio, mientras que las barras indican los intervalos de confianza. Las combinaciones categóricas están indicadas en el eje X.

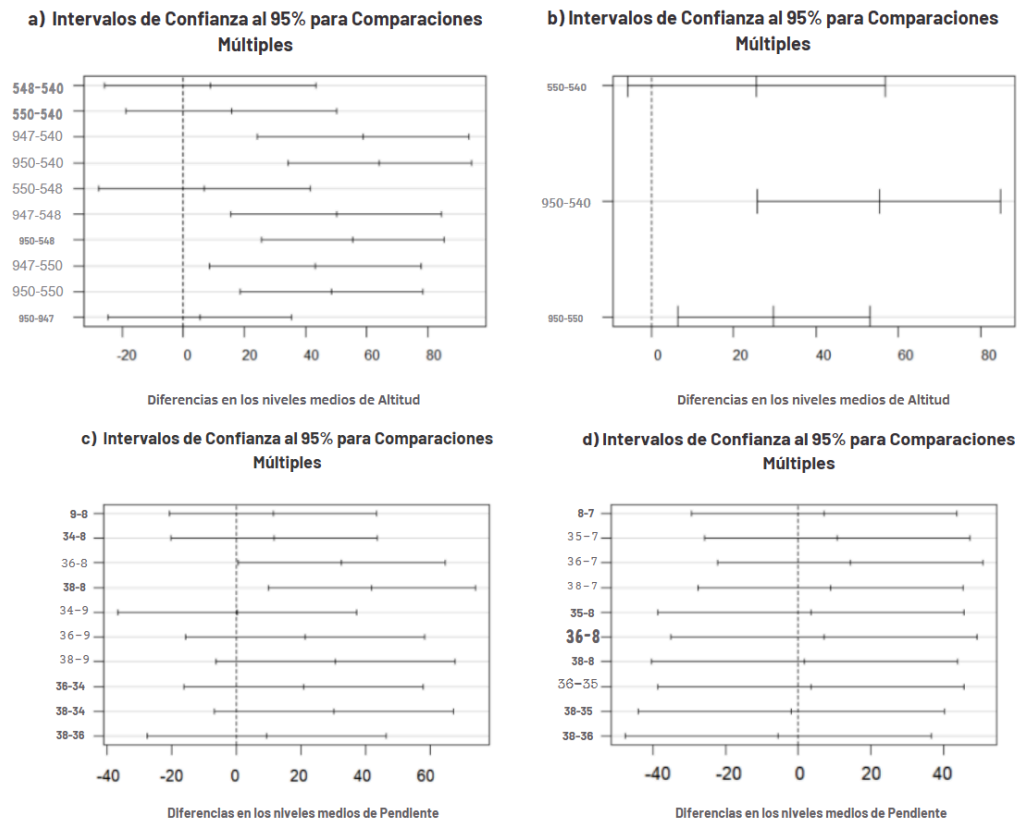
3.3.3 Análisis post hoc de Tukey para cada combinación de interacción pendiente-altitud con COS

La prueba de Tukey aplicada para evaluar la altitud en terrenos con pendientes menores a 10 grados mostró diferencias estadísticamente significativas entre varias combinaciones de altitudes (Fig. 10a). En particular, la comparación entre 947 y 540 m s.n.m. reveló la mayor diferencia significativa, con un valor p ajustado de 0.0003, seguida por las combinaciones 950-540 m s.n.m. y 950-550 m s.n.m., con valores p

ajustados de 0.0001 y 0.0006, respectivamente. Asimismo, la comparación entre 947-548 m s.n.m. también mostró una diferencia significativa (p ajustado de 0.0020). Por otro lado, las demás combinaciones no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$).

La prueba de Tukey aplicada para evaluar la altitud en terrenos con pendientes mayores a 30 grados mostró diferencias significativas entre algunas combinaciones de altitudes (Fig. 10b). La comparación entre 950 y 540 m s.n.m. presentó la mayor diferencia significativa, con un valor p ajustado de 0.0002, seguida por la comparación entre 950 y 550 m s.n.m., que también fue significativa, con un valor p ajustado de 0.0103. Por otro lado, la diferencia entre 550 y 540 m s.n.m. no fue estadísticamente significativa (p ajustado > 0.05).

La prueba de Tukey aplicada para comparar los grados de pendientes a una altitud de 550 m s.n.m. mostró diferencias significativas entre algunas combinaciones de pendientes (Fig. 10c). Específicamente, la comparación entre las pendientes 36-8 mostró una diferencia significativa con un valor p ajustado de 0.0456, y la diferencia más marcada se observó entre las pendientes 41-8, con un valor p ajustado de 0.0062. Para las demás combinaciones, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Finalmente, la prueba de Tukey aplicada para comparar los grados de pendientes a una altitud de 950 m s.n.m. no mostró diferencias estadísticamente significativas entre ninguna de las combinaciones de pendientes analizadas ($p > 0.05$) (Fig. 10d).



La Figura 10. Prueba de Tukey para las variables altitud y pendiente con Intervalos de confianza al 95%. (a) Altitudes con pendientes menores a 10 grados. (b) Altitudes con pendientes mayores a 30 grados. (c) Comparaciones entre pendientes a una altitud de 550 m s.n.m. (d) Comparaciones entre pendientes a una altitud de 950 m s.n.m.

3.3.4 Boxplot para las combinaciones altitud-pendiente

La figura 11 muestra las distribuciones de COS en función de la altitud y la pendiente. En (a), para pendientes menores a 10°, se observa que las altitudes más altas (947 y 950 m s.n.m.) presentan valores de COS más elevados y menos dispersos en comparación con altitudes más bajas (540, 548, y 550 m s.n.m.). Esto coincide con las diferencias significativas encontradas en la prueba de Tukey. En (b), para pendientes mayores a 30°, las altitudes de 950 y 540 m s.n.m. muestran las mayores diferencias, con un incremento notable en los valores de COS a mayor altitud.

En (c), a una altitud de 550 m s.n.m., los grados de pendiente 36 y 38 muestran los valores más altos de COS, con una menor dispersión, mientras que las pendientes 8 y 9 presentan valores más bajos y mayor variabilidad, lo que respalda los resultados significativos identificados en la prueba de Tukey. Finalmente, en (d), a una altitud de 950 m s.n.m., no se aprecian diferencias claras entre las categorías de pendiente, con distribuciones de COS más homogéneas y valores atípicos que reflejan cierta variabilidad en algunas pendientes.

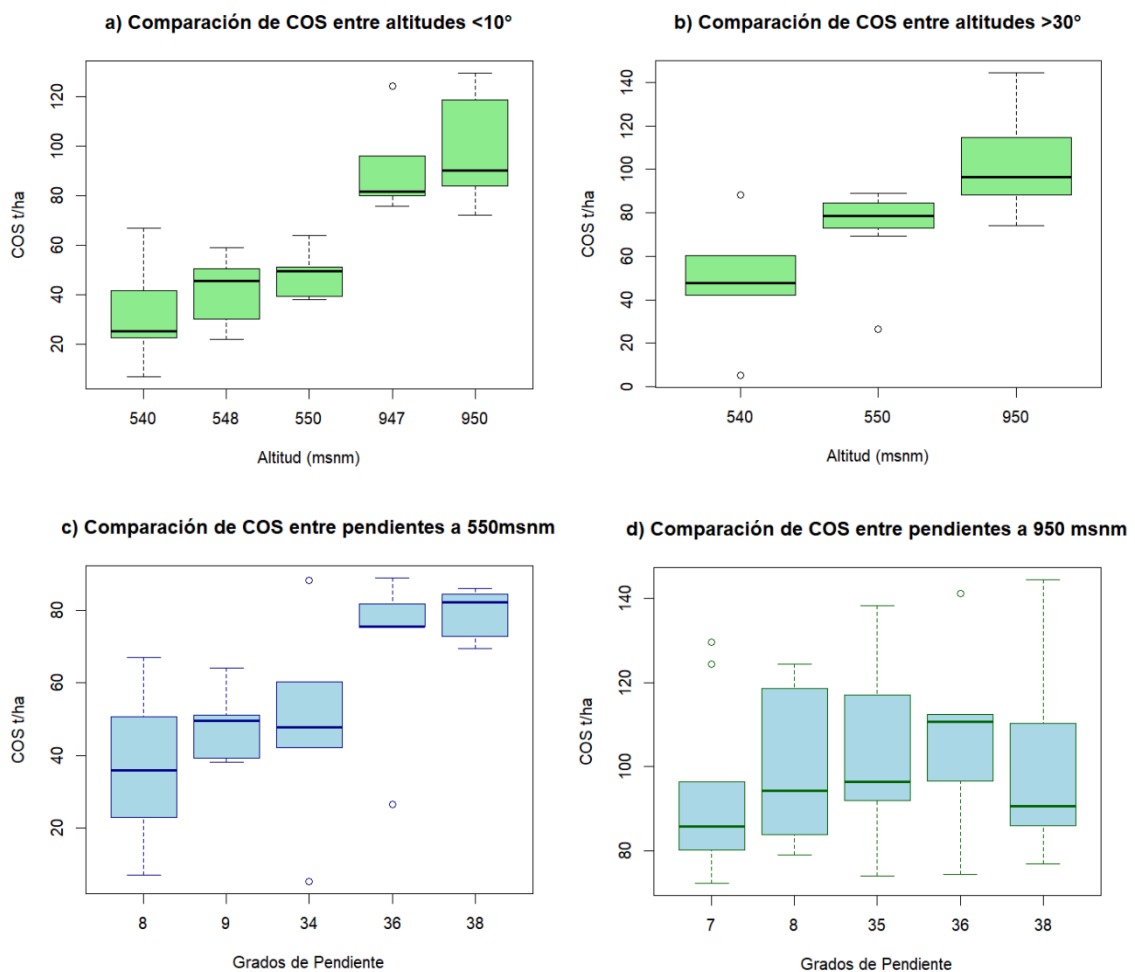


Figura 11. Comparación de las distribuciones de carbono orgánico del suelo (COS t/ha) en función de altitud y pendiente. (a) Muestra la distribución de COS entre diferentes altitudes en terrenos con pendientes menores a 10°. (b) Representa la distribución de COS entre altitudes en terrenos con pendientes mayores a 30°. (c) Muestra la distribución de COS entre diferentes grados de pendiente a una altitud de 550 m s.n.m. (d) Presenta la distribución de COS entre diferentes grados de pendiente a una altitud de 950 m s.n.m. Los boxplots ilustran la mediana (línea central), el rango intercuartílico (caja), los valores extremos (bigotes) y posibles valores atípicos (puntos).

3.4 Correlaciones entre variables

La matriz de correlación entre las variables muestra una fuerte correlación positiva entre %MO ($r = 1$), %CO y COS ($r = 0.86$), lo cual es consistente con las ecuaciones utilizadas para calcular el carbono orgánico del suelo (COS). Sin embargo, a pesar de que la densidad aparente (DA) también forma parte de la ecuación, su correlación con el COS es débil ($r = 0.22$), indicando que su influencia directa podría ser limitada en los datos analizados. Por otro lado, la altitud muestra una correlación positiva fuerte con el COS ($r = 0.72$), sugiriendo que los suelos a mayores altitudes tienden a almacenar más carbono. En cuanto a la profundidad, se encontró una correlación negativa significativa y fuerte, lo que indica que a mayor profundidad disminuye el contenido de carbono orgánico en el suelo. Finalmente, la pendiente presentó una correlación débil con el COS ($r = 0.26$), lo que sugiere que la inclinación del terreno tiene un impacto menor en la dinámica del carbono orgánico (Figura 12).

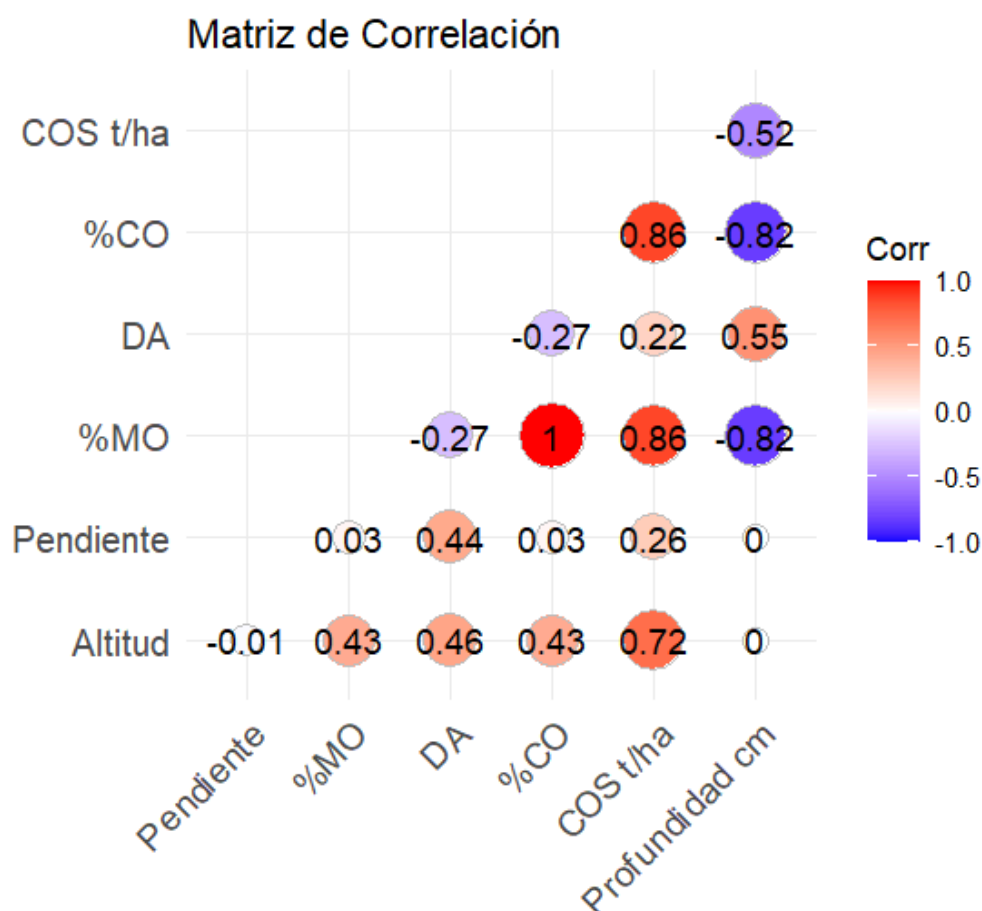


Figura 12. Matriz de correlación entre las variables evaluadas: carbono orgánico del suelo (COS t/ha), porcentaje de carbono orgánico (%CO), densidad aparente (DA), porcentaje de materia orgánica (%MO), pendiente, altitud y profundidad (cm). Los círculos indican la fuerza y la dirección de las correlaciones: los colores rojos representan correlaciones positivas, mientras que los colores azules representan correlaciones negativas. La intensidad del color y el tamaño de los círculos son proporcionales al coeficiente de correlación (r).

3.5 Modelo de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple construido para analizar la influencia de las variables altitud (m s.n.m.), pendiente (grados), %MO (porcentaje de materia orgánica), DA (densidad aparente) y profundidad sobre el carbono orgánico del suelo (COS t/ha) presentó un ajuste excelente, explicando el 96.9% de la variación observada ($R^2 = 0.969$) con un R^2 ajustado de 0.966. El modelo es estadísticamente significativo en su conjunto ($F = 337.2$; $p < 0.001$), lo que respalda su capacidad para explicar las relaciones entre las variables.

La altitud, medida en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), mostró un efecto positivo y significativo sobre el carbono orgánico del suelo, con un coeficiente de 0.03216 ($p < 0.001$). Esto indica que, por cada metro adicional de altitud, el carbono orgánico aumenta en promedio 0.03216 t/ha, manteniendo constantes las demás variables del modelo. La pendiente, representada en grados, también tuvo un efecto significativo (coeficiente = 0.0167; $p = 0.00384$). Esto indica que, por cada grado adicional de inclinación del terreno, el carbono orgánico aumenta en promedio 0.0167 t/ha, manteniendo constantes las demás variables. La materia orgánica (%MO) fue el factor con mayor influencia en el modelo, con un coeficiente de 7.066 ($p < 0.001$). Esto indica que un incremento del 1% en el contenido de materia orgánica se asocia con un aumento promedio de 7.066 t/ha en el carbono orgánico, resaltando la estrecha relación entre estos dos componentes. Por su parte, la densidad aparente (DA) también tuvo un efecto significativo y positivo, con un coeficiente de 5.503 ($p < 0.001$), lo que evidencia que su aumento está relacionado con un incremento en el carbono orgánico. Finalmente, la variable profundidad no resultó estadísticamente significativa (coeficiente = -0.000814, $p = 0.91$), lo que sugiere que no tiene un efecto lineal importante sobre el carbono orgánico cuando se consideran las demás variables del modelo (Figura 13).

El modelo de regresión lineal múltiple obtenido es el siguiente:

$$\text{COS(t/ha)} = -57.07 + 0.03216 * \text{Altitud} + 0.01672 * \text{Pendiente} + 7.066 * \% \text{MO} + 5.503 * \text{DA} - 0.000814 * \text{Profundidad}.$$

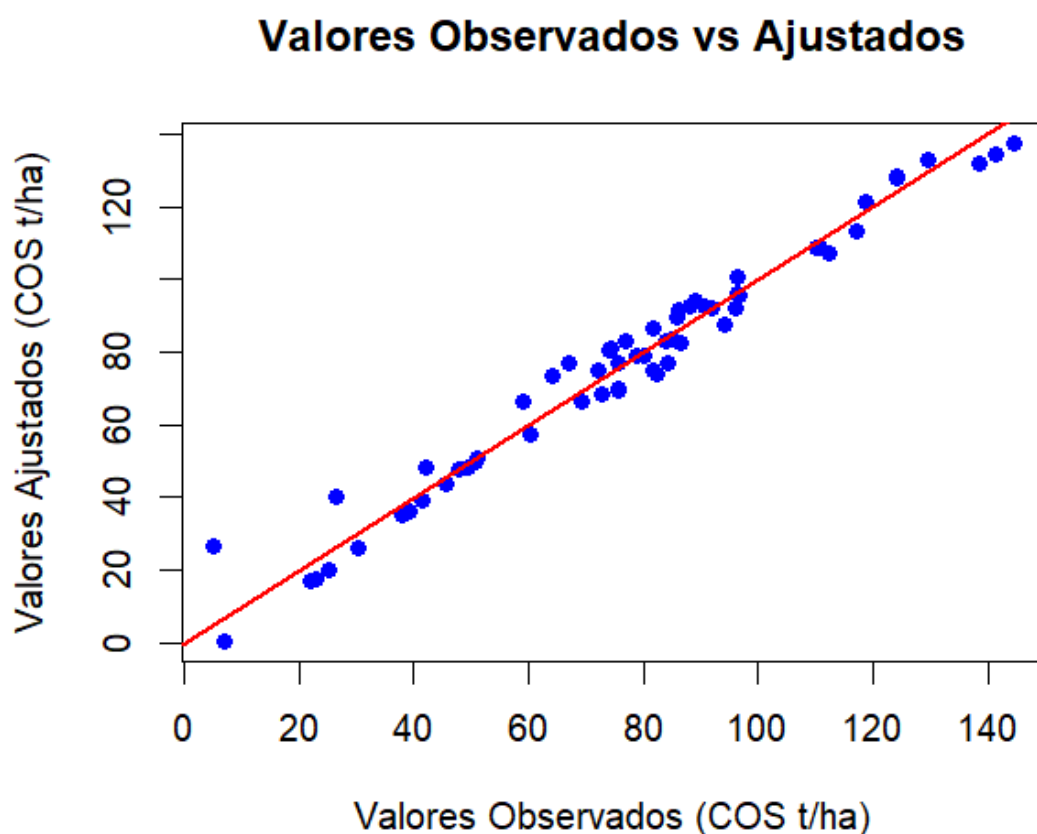


Figura 13. Comparación entre los valores observados y ajustados de carbono orgánico del suelo (COS t/ha) obtenidos a partir del modelo de regresión lineal múltiple. Los puntos azules representan los datos individuales, mientras que la línea roja muestra la línea de identidad ($y = x$). La distribución cercana de los puntos a la línea roja sugiere que el modelo predice con alta precisión los valores de carbono orgánico observados, confirmando su robustez y capacidad explicativa.

CAPÍTULO IV DISCUSIÓN

4.1 Análisis del contenido de COS

Al comparar los resultados de esta investigación con el mapeo digital de carbono orgánico en Ecuador (Loayza et al., 2020), realizado a partir de una recopilación y combinación de datos históricos de perfiles de suelos y métodos de mapeo digital estadísticos y espaciales, se observa una mayor cantidad de COS, alejándose de la tendencia del modelo, que indica niveles medios de COS en la zona piemontana de la cordillera oriental de los Andes entre 40 y 80 t/ha en la capa superficial de suelo. En esta investigación, los valores encontrados varían entre 60 y 140 t/ha en la capa superficial de suelo, lo que evidencia una subestimación del modelo en esta región. Esto podría explicarse por la mayor incertidumbre señalada en el modelo para las estimaciones de COS en la región amazónica, atribuida a la baja densidad de perfiles de suelo recolectados por la falta de información existente en esta región. El modelo menciona que los valores de COS son muy similares para los bosques piemontanos de la cordillera oriental y occidental. Sin embargo, en la zona occidental se dispone de una mayor cantidad de datos, lo que hace más preciso el modelo en esa región. Por el contrario, en la zona oriental al existir este déficit de información, incrementa la incertidumbre de las estimaciones. Es importante mencionar que este estudio complementa y amplía los resultados del mapeo de COS en Ecuador, al proporcionar datos empíricos que destacan la influencia combinada de altitud, pendiente y profundidad ya que no se limita a los primeros 30 cm de profundidad considerados en el modelo de Loayza et al., sino que evalúa el contenido de COS hasta un metro de profundidad, mostrando que el contenido total de COS a un metro aumenta significativamente. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar características locales y topográficas al modelar el COS, resaltando además el valor de estudios detallados por subregión para capturar la heterogeneidad de los ecosistemas en Ecuador.

4.2 Distribución vertical de COS

Los resultados obtenidos confirman que el COS disminuye con la profundidad, con valores significativamente más altos en las capas superficiales (0-20 cm), en línea con estudios previos (Lorenz y Lal, 2005; Soong et al., 2020). En promedio, entre el 26% y el 31% del COS total del primer metro se concentra en los primeros 20 cm, mientras que el resto, entre el 69% y el 74%, se encuentra distribuido en los siguientes 80 cm. Esta tendencia se explica en parte por el aporte continuo de materia orgánica desde la superficie, como hojarasca y exudados radiculares, y por la mayor actividad biológica en estas capas superiores (Kafle, 2019). En ecosistemas tropicales con suelos ácidos usualmente son profundamente meteorizados, tienen una capacidad notable para almacenar COS en el subsuelo debido a la formación de asociaciones órgano-minerales, que estabilizan el carbono y lo protegen de la descomposición microbiana (Dong et al., 2021; Acosta-Mireles et al., 2022).

Se ha demostrado que en pendientes más pronunciadas ($>30^\circ$), la redistribución de materia orgánica desde las capas superiores hacia las inferiores es más común, mientras que en pendientes menores ($<10^\circ$) se observa una acumulación más uniforme (Dong et al., 2021; Kafle, 2019). La influencia de la altitud, particularmente en suelos tropicales, está asociada a cambios en la temperatura, la humedad y el tipo de vegetación, lo cual afecta directamente la dinámica del carbono (Lorenz y Lal, 2005).

Estos resultados resaltan la necesidad de integrar análisis del COS a capas más profundas, en estrategias de mitigación del cambio climático, como los proyectos REDD+, y en el manejo sostenible de suelos tropicales (Soong et al., 2020; Acosta-Mireles et al., 2022). La consideración de factores topográficos y edáficos en los modelos de distribución del COS podría mejorar significativamente las estimaciones de secuestro de carbono a nivel global. Ignorar el carbono subterráneo lleva a subestimar el valor de los bosques en términos de mitigación del cambio climático. La integración de datos de suelo más profundos en las evaluaciones de carbono podría aumentar el

valor económico de los proyectos REDD+ y mejorar su viabilidad para comunidades locales (Soong et al., 2020).

4.3 Efecto altitud pendiente

Otro aspecto clave de este estudio fue la confirmación que la altitud tiene un efecto altamente significativo sobre los niveles de COS, evidenciando un incremento a mayor altitud. Este hallazgo es consistente con otros estudios, como lo señala Devi (2021), quien realizó una revisión bibliográfica centrada en las variables que afectan el carbono orgánico del suelo destacando que las altitudes superiores favorecen la acumulación de COS debido a la disminución de la actividad microbiana y la reducción en la descomposición de materia orgánica provocada por temperaturas más bajas. Este mecanismo resulta ser un factor determinante en el bosque siempreverde piemontano estudiado, donde las condiciones altitudinales crean un ambiente propicio para la estabilización del carbono. Estudios complementarios, como los de Gebeyehu et al. (2019), Saimun et al. (2021), Llerena et al. (2022), Okello et al. (2023) y corroboran esta tendencia en diversos ecosistemas tropicales. Sin embargo, estas investigaciones también subrayan que, aunque el carbono orgánico se acumula mayormente en altitudes superiores, esta tendencia puede ser modulada por factores adicionales. Entre ellos se incluyen las diferencias en especies dominantes y funcionales, características locales del tipo de vegetación, composición florística, topografía y propiedades específicas del suelo. Estos elementos destacan la importancia de adoptar un enfoque holístico para comprender cómo interactúan estas variables en el almacenamiento de carbono, ofreciendo una visión más integrada y precisa del proceso.

En el caso de la pendiente, los resultados de este estudio muestran que el contenido de COS es mayor en pendientes más pronunciadas ($>30^\circ$). Este hallazgo contrasta con algunos estudios previos, como los de Gong et al. (2008), Conforti et al. (2016), Gebeyehu et al. (2019), Siswo et al. (2023) y , que reportan una disminución del COS

en pendientes más empinadas debido a una mayor erosión y escorrentía. Sin embargo, esta discrepancia puede explicarse por la dificultad de acceso en pendientes muy pronunciadas, lo que reduce significativamente el impacto antrópico, como lo señala Raza et al. (2021). Además, factores bióticos, como diferencias en especies dominantes y funcionales, características locales de la vegetación, composición florística y propiedades específicas del suelo, también influyen en el contenido de COS (Llerena, 2020). Un dosel denso puede proteger el suelo de la erosión y del impacto directo de lluvias torrenciales, reduciendo la descomposición rápida de la materia orgánica y facilitando su estabilización. Esta cobertura vegetal actúa como una barrera natural que disminuye la velocidad del agua, la vegetación protege contra la erosión, estabiliza el suelo y promueve la acumulación de carbono a través de la caída de hojarasca y residuos vegetales (Gebeyehu et al., 2019), Reza et al., 2021; . Además, la edad del bosque es un factor importante en la dinámica del COS; los bosques más antiguos acumulan mayores cantidades de carbono debido al tiempo necesario para la formación de capas orgánicas y la incorporación de residuos vegetales (Devi, 2021). En este contexto, la historia del suelo en el sitio de estudio es clave, ya que estas áreas son el resultado de un proceso de sucesión ecológica de más de 14 años, tras haber sido utilizadas para cultivos y pastoreo. Las zonas planas fueron las más afectadas por la actividad humana, mientras que las pendientes más empinadas, al ser menos accesibles, pudieron mantener una mayor cobertura vegetal y estabilidad del suelo.

4.4 Análisis de correlación

Un aspecto que se resalta en la matriz de correlación es la débil correlación entre la pendiente y el COS, esto podría explicarse por la interacción de múltiples factores que enmascaran una relación directa. Estudios previos han demostrado que la redistribución del COS en paisajes inclinados es altamente variable debido a procesos de erosión y deposición, influenciados por características locales como la cobertura vegetal y la geomorfología (Chaplot et al., 2009, Dialynas et al., 2016). Además, el manejo del suelo y el uso del terreno pueden tener un efecto significativo en el stock de COS, mientras que la posición en la pendiente a menudo muestra una influencia

limitada (Tumwesigye et al., 2020). Por último, patrones atípicos en la acumulación de carbono a lo largo de pendientes, como los identificados en bosques tropicales, podrían estar relacionados con diferencias en el desarrollo radicular y las condiciones de humedad del suelo, lo que diluye la correlación estadística entre la pendiente y el COS (Takahashi et al., 2019). Estas complejas interacciones resaltan la necesidad de enfoques más integrados para entender la dinámica del carbono en paisajes inclinados.

De manera similar, la baja correlación observada entre la densidad aparente y el contenido de COS en este estudio puede atribuirse a la complejidad de las interacciones entre estas variables en suelos tropicales. Como señalan Don et al. (2010), la densidad aparente está influenciada por factores como la textura del suelo, las prácticas de manejo y los cambios en el uso del suelo, lo que introduce una variabilidad significativa en su relación con el COS. Además, Warren et al. (2012) destacan que la variabilidad vertical dentro del perfil del suelo y las propiedades texturales locales pueden dificultar la predicción del COS a partir de la densidad aparente. Por otro lado, Nengi-Benwari et al. (2022) encontraron que, aunque la densidad aparente puede correlacionarse positivamente con el COS, en ciertos casos esta relación está mediada por factores adicionales como el contenido de arcilla y los cambios estacionales.

En esta investigación no se tomó en cuenta las diferentes texturas del suelo y su variación a lo largo de el perfil vertical hasta un metro. Sin embargo, se ha demostrado que los suelos con mayor contenido de arcilla y limo pueden retener más COS debido a la formación de agregados estables y a la adsorción de materia orgánica en partículas minerales (Matus & Maire, 2000). Sin embargo, la capacidad de almacenamiento del COS en estos suelos no depende únicamente de su textura, sino también del grado de saturación del carbono en las fracciones finas del suelo (Matus et al., 2000). Por otro lado, los modelos de distribución del COS con la profundidad han evidenciado que en suelos arcillosos la disminución del carbono con la profundidad es menos pronunciada en comparación con suelos de textura gruesa, lo que sugiere que los suelos más finos

pueden estabilizar el COS a mayores profundidades (Matus y Maire, 2000; Distribución del COS en suelos de México, 2016). Además, la interacción entre el COS y los minerales del suelo permite la protección del carbono contra la degradación microbiana, lo que explica por qué en suelos de textura fina la mineralización del carbono es más lenta y su almacenamiento a largo plazo es mayor (Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo, 2008). No obstante, se ha observado que en suelos con una alta proporción de arcilla, la superficie específica efectiva para la adsorción del COS puede disminuir debido a la formación de agregados compactos, lo que puede limitar su capacidad de retención en ciertas condiciones (Matus & Maire, 2000). En este sentido, la acumulación y estabilidad del COS en profundidad no solo está determinada por la textura del suelo, sino por la saturación de carbono en las fracciones finas y la dinámica de agregación del suelo, factores clave para comprender la capacidad de los suelos para actuar como sumideros de carbono y mitigar el cambio climático. En conjunto, todas estas observaciones resaltan la importancia de considerar múltiples variables edáficas al analizar las relaciones del COS.

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

El presente estudio ha demostrado que el contenido de COS está significativamente influenciado por la altitud, la pendiente y la interacción de ambas variables, lo que subraya la importancia de considerar factores topográficos en la estimación y manejo de carbono en ecosistemas tropicales. Los resultados revelaron que a mayor altitud (950 m s.n.m.), los niveles de COS son considerablemente más altos en comparación con altitudes más bajas (550 m s.n.m.), debido probablemente a las condiciones climáticas como temperaturas más bajas y mayor humedad, que favorecen la acumulación y estabilización del carbono en el suelo. En pendientes más pronunciadas (>30° de inclinación), se registraron mayores contenidos de COS en comparación con pendientes menos pronunciadas (<10° de inclinación), donde se registró menor contenido de COS.

La distribución del COS con la profundidad mostró una disminución progresiva, con las capas superficiales (0-20 cm) concentrando hasta el 31% del carbono total, mientras que los horizontes profundos (20-100 cm) representaron hasta el 74% del COS total, resaltando la importancia de incluir estas capas en estudios de almacenamiento de carbono. Este estudio contribuye al conocimiento sobre el carbono orgánico en ecosistemas tropicales, específicamente en el bosque siempreverde piemontano, al proporcionar datos empíricos que pueden ser utilizados para mejorar modelos predictivos y desarrollar estrategias de manejo sostenible. Además, enfatiza la importancia de investigaciones que incluyan capas profundas del suelo y factores abióticos en regiones con alta biodiversidad, como las inmediaciones de la Reserva Biológica Colonso Chalupas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Mireles, M., Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2022). Patrones de distribución a profundidad del carbono orgánico del suelo en diferentes usos del suelo y manejo. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1321>
- Agrocalidad. (2018). *Instructivo INT/SFA/10 muestreo para análisis de suelo*. Recuperado de <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/agua8.pdf>
- Ahmad, K. W., & Wang, G. (2023). Evaluating the Crucial Relationships between Soil Health and Climate Change. *Journal of Environmental Impact and Management Policy*, 41, 8–21. <https://doi.org/10.55529/jeimp.41.8.21>
- Artaxo, P., Hansson, H. C., Machado, L. A. T., & Rizzo, L. V. (2022). Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. *PLOS Climate*, 1(8), e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- Bangroo, S. A., Najar, G., & Rasool, A. (2017). Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. *Catena*, 158, 63–68. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.06.017>
- Barrezueta-Unda, S. (2021). El efecto de diversos atributos topográficos sobre el carbono orgánico en varios usos del suelo. *Ciencia Unemi*, 14(35), 43–53. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss35.2021pp43-53p>
- Bautista, J. I., & Hernández, J. J. A. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Baveye, P. (2006). Comment on “Soil structure and management: A review” by C.J. Bronick and R. Lal. *Geoderma*, 134(1–2), 231–232. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.10.003>
- Bogdanets, V., & Nosenko, V. (2022). Indicators of sustainable development of safety land use and assessment of degradation processes development of soil cover using GIS models. 3 (2022). <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2022.03.08>
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Chan, T., Arus Gomez, C., Kothikar, A., & Baiz, P. (2022). Joint study of above ground biomass and soil organic carbon for total carbon estimation using satellite imagery in Scotland. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2205.04870>
- Chaplot, V., Podwojewski, P., Phachomphon, K., & Valentin, C. (2009). Soil erosion impact on soil organic carbon spatial variability on steep tropical slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 73(3), 769–779. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0031>
- Che, M., Gong, Y., Xu, M., Kang, C., Lv, C., He, S., & Zheng, J. (2020). Effects of elevation and slope aspect on the distribution of the soil organic carbon associated with Al and Fe mineral phases in alpine shrub-meadow soil. *The Science of the Total Environment*, 753, 141933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141933>

- Clima Provincia de Napo: Climograma, temperatura y tabla climática para Provincia de Napo. (s. f.). Recuperado de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-napo-58/>
- Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G., & Buttafuoco, G. (2016). Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, 144, 23–33. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.04.023>
- Cusack, D. F., & Turner, B. L. (2020). Fine root and soil organic carbon depth distributions are inversely related across fertility and rainfall gradients in lowland tropical forests. *Ecosystems*, 24(5), 1075–1092. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00569-6>
- Dalal, R. C., Allen, D. E., Chan, K. Y., & Singh, B. P. (2011). Soil organic matter, soil health and climate change. En *Soil Biology* (pp. 87–106). https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8_5
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165–173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- De la Cruz-Amo, L., Bñares-de-Dios, G., Cala, V., La Cerda, Í. G., Espinosa, C., Ledo, A., Salinas, N., Macía, M., & Cayuela, L. (2020). Trade-offs among aboveground, belowground, and soil organic carbon stocks along altitudinal gradients in Andean tropical montane forests. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00106>
- De los Ángeles Agostini, M., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A., & Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *DOAJ (Directory Of Open Access Journals)*. <https://doaj.org/article/11ac6286936e4609992f9be57fc5ee1b>
- Devi, A. S. (2021). Influence of trees and associated variables on soil organic carbon: a review. *Journal of Ecology and Environment*, 45. <https://doi.org/10.1186/s41610-021-00180-3>
- Dialynas, Y. G., Bastola, S., Bras, R. L., Marin-Spiotta, E., Silver, W. L., Arnone, E., & Noto, L. V. (2016). Impact of hydrologically driven hillslope erosion and landslide occurrence on soil organic carbon dynamics in tropical watersheds. *Water Resources Research*, 52(11), 8895–8919. <https://doi.org/10.1002/2016wr018925>
- Dieleman, W. I. J., Venter, M., Ramachandra, A., Krockenberger, A. K., and Bird, M. I. (2013). Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. *Geoderma* 204–205, 59–67. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.005
- Domke, G. M., Perry, C. H., Walters, B. F., Nave, L. E., Woodall, C. W., & Swanston, C. W. (2017). Toward inventory-based estimates of soil organic carbon in forests of the United States. *Ecological Applications*, 27. <https://doi.org/10.1002/eap.1516>
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2010). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Dong, J., Zhou, K., Jiang, P., Wu, J., & Fu, W. (2021). Revealing horizontal and vertical variation of soil organic carbon, soil total nitrogen and C:N ratio in subtropical forests of southeastern China. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112483>
- Enescu, R., Dincă, L., Vasile, D., & Vlad, R. (2022). Does the Slope Aspect Influence the Soil Organic Matter Concentration in Forest Soils? *Forests*, 13(9), 1472. <https://doi.org/10.3390/f13091472>
- Esri. (2019). *ArcMap (versión 10.7) [Software]*. Environmental Systems Research Institute, Inc. <https://www.esri.com>

- Fagua, C. P., Landínez-Torres, Á. Y., & Parra, A. S. (2023). Carbono orgánico y su dinámica en suelos tropicales: una revisión. *Revista Juan de Castellanos*. <https://doi.org/10.38017/1657463X.820>
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Sardans, J., Luyssaert, S., Campioli, M., Chapin, F. S. I., Ciais, P., Malhi, Y. S., Obersteiner, M., Papale, D., Piao, S., Reichstein, M., Rodà, F., & Peñuelas, J. (2014). Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. *Nature Climate Change*, 4. <https://doi.org/10.1038/nclimate2177>
- Figuerola Jáuregui, M. L., Martínez Menez, M. R., Ortiz Solorio, C. A., & Fernández Reynoso, D. (2018). Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 287-299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). Global Soil Organic Carbon Map – GSOCMAP v.1.6. <https://doi.org/10.4060/cb9015en>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). An {R} Companion to Applied Regression. Thousand Oaks, CA: Sage. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=car>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). An {R} Companion to Applied Regression. Thousand Oaks, CA: Sage. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=car>
- Galicia, L., Cáceres, A. M., Cram, S., Vergara, B. M. C., Ramírez, V. P., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:87740275>
- Gebeyehu, G., Soromessa, T., Bekele, T., & Teketay, D. (2019). Carbon stocks and factors affecting their storage in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. *Journal Of Ecology And Environment*, 43(1). <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0105-8>
- GOBIERNO DE CHILE. (2015). *PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRAS DE SUELOS*. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de <https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/Protocolo%20toma%20muestras%20suelo.pdf>
- Gomes, L., Faria, R. M., de Souza, E., Veloso, G., Schaefer, C., & Filho, E. F. (2019). Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.GEODERMA.2019.01.007>
- Gonçalves, D. R. P., Mishra, U., Wills, S., & Gautam, S. (2021). Regional environmental controllers influence continental scale soil carbon stocks and future carbon dynamics. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85992-y>
- Gong, X., Brueck, H., Giese, K. M., Zhang, L., Sattelmacher, B., & Lin, S. (2008). Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 72(4), 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.07.001>
- Gray, J. M., Bishop, T. F., & Wilson, B. R. (2015). Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks with Depth in Eastern Australia. *Soil Science Society Of America Journal*, 79(6), 1741-1751. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.06.0224>
- Guo, Y., Zeng, Z., Wang, J., Zou, J., Shi, Z., & Chen, S. (2023). Research advances in mechanisms of climate change impacts on soil organic carbon dynamics. *Environmental Research Letters*, 18(10), 103005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acfa12>
- Hobley, E. U., & Wilson, B. (2016). The depth distribution of organic carbon in the soils of eastern Australia. *Ecosphere*, 7(1), e01214. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1214>

- Instituto Geológico y Minero del Ecuador (INIGEMM). (1982). Mapa geológico del Ecuador 1:500,000. INIGEMM. recuperado de:
https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/MapasBiblioteca/Geolog-Ecuador-25pc.pdf
- James, J., & Harrison, R. (2016). The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis. *Forests*, 7(12), 308. <https://doi.org/10.3390/f7120308>
- Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D., & Komlen, V. (2021). Influence of Slope Gradient and Aspect on Soil Organic Carbon Content in the Region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/su13158332>
- Kafle, G. (2019). Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Nitrogen in a Tropical Community Forest of Nepal. *International Journal of Forestry Research*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2019/3087570>
- Kassambara, A. (2019). ggcorrplot: Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2'. R package version 0.1.3. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=ggcorrplot>
- Kaur, B., Gupta, S. R., & Singh, G. (2000). Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Applied Soil Ecology*, 15(3), 283–294. [https://doi.org/10.1016/s0929-1393\(00\)00079-2](https://doi.org/10.1016/s0929-1393(00)00079-2)
- Kunkel, M., Flores, A., Smith, T., McNamara, J., & Benner, S. (2011). A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain. *Geoderma*, 165, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.011>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3285–3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Li, C., Xiao, C., Li, M., Xu, L., & He, N. (2022). A global synthesis of patterns in soil organic matter and temperature sensitivity along the altitudinal gradient. *Frontiers In Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.959292>
- Liao, K., Wu, S., & Zhu, Q. (2016). Can Soil pH Be Used to Help Explain Soil Organic Carbon Stocks? *CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(12), 1685–1689. <https://doi.org/10.1002/clen.201600229>
- Llerena, S. A., Kurbatova, A. I., & Grigorets, E. A. (2022). Carbon sequestration in Tropical Montane Cloud Forests. *SOCIALNO-ECOLOGICHESKIE TECHNOLOGII*, 11(3), 377-397. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-377-397>
- Loayza, N. V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., & Jiménez, W. (2020). Digital mapping of organic carbon in Ecuador soils. *Ecosistemas*, 29(2). <https://doi.org/10.7818/ecos.1852>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. In *Advances in Agronomy*. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(05\)88002-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(05)88002-2)
- Lorenz, K., Lal, R., & Ehlers, K. (2019). Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' Sustainable Development Goals. *Land Degradation & Development*, 30, 824–838. <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>

- Luo, Z., Viscarra-Rossel, R. A., & Qian, T. (2021). Similar importance of edaphic and climatic factors for controlling soil organic carbon stocks of the world. *Biogeosciences*, 18(6), 2063-2073. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2063-2021>
- MAGAP-CLIRSEN (2011). Memoria técnica: Evaluación de tierras por su capacidad de uso, cantón Guayaquil. Proyecto "Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000". Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, y Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos. Recuperado de: https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/guayaquil/mt_guayaquil_capacidad_uso_de_la_tierra.pdf
- Malla, R., Neupane, P. R., & Köhl, M. (2022). Modelling Soil Organic Carbon as a Function of Topography and Stand Variables. *Forests*, 13(9), 1391. <https://doi.org/10.3390/f13091391>
- Martínez H, Eduardo, Fuentes E, Juan Pablo, & Acevedo H, Edmundo. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Massaccesi, L., De Feudis, M., Leccese, A., & Agnelli, A. (2020). Altitude and vegetation affect soil organic carbon, basal respiration and microbial biomass in Apennine forest soils. *Forests*, 11(6), 710. <https://doi.org/10.3390/f11060710>
- Mathieu, J. A., Hatté, C., Balesdent, J., & Parent, E. (2015). Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: A worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Global Change Biology*, 21. <https://doi.org/10.1111/gcb.13012>
- Matus, Francisco J., & Maire G., Christian R.. (2000). RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO, TEXTURA DEL SUELO Y TASAS DE MINERALIZACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072000000200003>
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). Guía técnica para muestreo de suelos. Primera edición. Universidad Nacional Agraria (UNA) y Catholic Relief Services (CRS). Recuperado de: <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, & Subsecretaría de Patrimonio Natural. (2013). Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf
- Mobley, M. L., Lajtha, K. J., Kramer, M. G., Bacon, A. R., Heine, P. R., & Richter, D. (2014). Surficial gains and subsoil losses of soil carbon and nitrogen during secondary forest development. *Global Change Biology*, 20(8), 2492-2504. <https://doi.org/10.1111/gcb.12715>
- Morales, J., & Serrano, L. (2019). Cuantificación del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono en el suelo de los ecosistemas Bosque Siempre-Verde de Tierras Bajas, Bosque Siempre-Verde de Pie de Monte y Bosque Siempre-Verde Andino Montano Bajo de la provincia del Napo. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16960>
- Moreno, F., Oberbauer, S. F., & Lara, W. (2017). Soil Organic Carbon Sequestration Under Different Tropical Cover Types in Colombia. In *Managing forest ecosystems* (pp. 367-383). https://doi.org/10.1007/978-3-319-28250-3_18
- Mulder, V. L., Lacoste, M., Martin, M. P., Richer-de-Forges, A., & Arrouays, D. (2015). Understanding large-extent controls of soil organic carbon storage in relation to soil depth and soil-landscape systems. *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 1210-1229. <https://doi.org/10.1002/2015GB005178>

- Nengi-Benwari, A. O., Udom, B. E., & Orji, O. A. (2022). CLAY CONTENT, BULK DENSITY AND CARBON STORAGE RELATIONSHIPS IN MANGROVE AND RAINFOREST SOILS DURING DRY AND WET SEASONS. *Journal Of Global Ecology And Environment*, 22-30. <https://doi.org/10.56557/jogee/2022/v15i27511>
- Okello, J., Bauters, M., Verbeeck, H., Bodé, S., Kasenene, J., François, A., Engelhardt, T., Butterbach-Bahl, K., Kiese, R., & Boeckx, P. (2023). Temperature sensitivity of soil organic carbon respiration along a forested elevation gradient in the Rwenzori Mountains, Uganda. *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-20-719-2023>
- Orjuela, H. B. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Patiño, J., Lozano, C. P., Tipán, C., Navarrete, H., López, R., Asanza, M., & Torres, B. (2015). Composición florística y estructura de un bosque siempreverde piemontano de 600 a 700 m s.n.m. en la cuenca del río Piatúa, Napo, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(2), 166-214. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5292893.pdf>
- Paz, Fernando, & Etchevers, Jorge. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355. Recuperado en 27 de febrero de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300339&lng=es&tng=es.
- Phillips, J., Ramirez, S., Wayson, C., & Duque, A. (2019). Differences in carbon stocks along an elevational gradient in tropical mountain forests of Colombia. *Biotropica*, 51(4), 490–499. <https://doi.org/10.1111/btp.12675>
- Pinzon, M. H. S., Contento, P. A. R., Del Carmen Gusman Montalvan, E., Valdivieso, J. I. B., Miguitama, P. G. Q., & Alvarez, L. S. J. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas de carbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 27(3), 116–122. <https://doi.org/10.7818/ecos.1521>
- Poorter, L., Van Der Sande, M. T., Thompson, J., Arets, E. J. M. M., Alarcón, A., Álvarez-Sánchez, J., Ascarrunz, N., Balvanera, P., Barajas-Guzmán, G., Boit, A., Bongers, F., Carvalho, F. A., Casanoves, F., Cornejo-Tenorio, G., Costa, F. R. C., De Castilho, C. V., Duivenvoorden, J. F., Dutrieux, L. P., Enquist, B. J., ... Peña-Claros, M. (2015). Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24(11), 1314–1328. <https://doi.org/10.1111/geb.12364>
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- Raich, J. W., Russell, A. E., Kitayama, K., Parton, W. J., and Vitousek, P. M. (2006). Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology* 87, 76–87. doi: 10.1890/05-0023
- Raza, S., Zamanian, K., Ullah, S., Kuzyakov, Y., Virto, I., & Zhou, J. (2021). Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation. *Journal Of Cleaner Production*, 315, 128036. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128036>
- Rial, M., Cortizas, A. M., & Rodríguez-Lado, L. (2017). Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils. *The Science Of The Total Environment*, 609, 1411-1422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.012>
- Richter, D. B., & Billings, S. A. (2015). 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone. *New Phytologist*, 206(3), 900-912. <https://doi.org/10.1111/nph.13338>

- RStudio Team. (2023). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL: <https://posit.co/>
- Saimun, M. S. R., Karim, M. R., Sultana, F., & Arfin-Khan, M. A. (2021). Multiple drivers of tree and soil carbon stock in the tropical forest ecosystems of Bangladesh. *Trees Forests And People*, 5, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100108>
- Shi, P., Duan, J., Zhang, Y., Li, P., Wang, X., Li, Z., Xiao, L., Xu, G., Lu, K., Cheng, S., Ren, Z., Zhang, Y., & Yang, W. (2018). The effects of ecological construction and topography on soil organic carbon and total nitrogen in the Loess Plateau of China. *Environmental Earth Sciences*, 78(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7992-3>
- Siswo, N., Kim, H., Lee, J., & Yun, C.-W. (2023). Influence of Tree Vegetation and The Associated Environmental Factors on Soil Organic Carbon; Evidence from “Kulon Progo Community Forestry,” Yogyakarta, Indonesia. *Forests*, 14(2), 365. <https://doi.org/10.3390/f14020365>
- Soethe, N., Lehmann, J., and Engels, C. (2007). Carbon and nutrient stocks in roots of forests at different altitudes in the Ecuadorian Andes. *J. Trop. Ecol.* 23, 319–328. doi: 10.1017/S0266467407004002
- Soong, J.L., Janssens, I.A., Grau, O. et al. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. *Sci Rep* 10, 2302 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58913-8>
- Soussana, J., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E., Chotte, J., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., & Lal, R. (2017). Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 - soils for food security and climate’ initiative. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2017.12.002>
- Strey, S., Boy, J., Strey, R., Welpelo, A., Schönenberg, R., Schumann, C., & Guggenberger, G. (2017). Digging deeper: the value of deep soil carbon for potential REDD+ projects in tropical forest communities in Amazonia. *Erdkunde*, 71(3), 231-239. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2017.03.05>
- Subashree, K., Dar, J. A., & Sundarapandian, S. (2019). Variation in soil organic carbon stock with forest type in tropical forests of Kanyakumari Wildlife Sanctuary, Western Ghats, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7881-6>
- Takahashi, M., Hirai, K., Marod, D., Anusontpornperm, S., Limtong, P., Leaungvutivirog, C., & Panuthai, S. (2019). Atypical Pattern of Soil Carbon Stocks along the Slope Position in a Seasonally Dry Tropical Forest in Thailand. *Forests*, 10(2), 106. <https://doi.org/10.3390/f10020106>
- Tumwesigye, W., Wasige, J., & Thomas, G. (2015). Effect of land use change and slope position on soil organic carbon in Kitabi Watershed Rwanda. *Journal Of Scientific And Innovative Research*, 4(5), 213-217. <https://doi.org/10.31254/jsir.2015.4505>
- Wade, A., Richter, D., Medjibe, V., Bacon, A., Heine, P., White, L., & Poulsen, J. (2019). Estimates and determinants of stocks of deep soil carbon in Gabon, Central Africa. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.01.004>
- Warren, M. W., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Anshari, G., Hergoualc’h, K., Kurnianto, S., Purbopuspito, J., Gusmayanti, E., Afifudin, M., Rahajoe, J., Alhamd, L., Limin, S., & Iswandi, A. (2012). A cost-efficient method to assess carbon stocks in tropical peat soil. *Biogeosciences*, 9(11), 4477-4485. <https://doi.org/10.5194/bg-9-4477-2012>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. URL: <https://ggplot2.tidyverse.org>

- Yang, C., Shropshire, G. J., & Peterson, C. L. (1997). Measurement of ground slope and aspect using two inclinometers and GPS. *Transactions of the ASAE*, 40(6), 1769-1776. <https://doi.org/10.13031/2013.21409>
- Zagal V., Erick, Sadzawka R., Angélica (2007). Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos [en línea]. Santiago, Chile: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/30754> (Consultado: 27 de febrero de 2025).
- Zhou, P., Zhang, L., & Qi, S. (2022). Plant Diversity and Aboveground Biomass Interact with Abiotic Factors to Drive Soil Organic Carbon in Beijing Mountainous Areas. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su141710655>
- Zinn, Y. L., Lal, R., Bigham, J. M., & Resck, D. V. S. (2007). Edaphic Controls on Soil Organic Carbon Retention in the Brazilian Cerrado: Texture and Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1204. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0014>
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., et al. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems* 13, 62–74. doi: 10.1007/s10021-009-9300-2

ANEXOS

ANEXO A: Fotografías muestreo en campo



ANEXO B: Fotografías fase de laboratorio

