



1859

UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Ambiental

**Evaluación de carbono orgánico edáfico bajo distintos usos de
suelo en la microcuenca San Simón, cantón Loja**

Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Wagner Servio Diaz Sarango

DIRECTOR:

Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo *Mg.Sc*

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 7 de marzo de 2024

Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo *Mg.Sc*

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de la elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Evaluación de carbono orgánico edáfico bajo distintos usos de suelo en la microcuenca San Simón, cantón Loja**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Ambiental**, de la autoría del estudiante **Wagner Servio Diaz Sarango**, con **cédula de identidad Nro.1150585923**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo *Mg.Sc*

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Wagner Servio Diaz Sarango**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mí Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Wagner Servio Diaz Sarango

Cédula: 1150585923

Fecha: 19/11/2024

Correo electrónico: wagner.diaz@unl.edu.ec

Celular: 0999502534

Carta de autorización por parte del autor para consulta, reproducción parcial o total, y publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo **Wagner Servio Diaz Sarango**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Evaluación de carbono orgánico edáfico bajo distintos usos de suelo de la microcuenca San Simón, cantón Loja**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Ambiental**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los diecinueve días del mes de noviembre de dos mil veinticuatro.



Autor: Wagner Servio Diaz Sarango

Cédula: 11505859523

Dirección: Ciudad Victoria

Correo electrónico: wagner.diaz@unl.edu.ec

Teléfono: 2326725

Celular: 0999502534

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular:

Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo *Mg.Sc*

Dedicatoria

Dedico este Trabajo de Integración Curricular, fruto de mi esfuerzo y perseverancia, a quienes han sido mi apoyo incondicional durante este viaje académico:

A mis padres Irma y Selvio, por su amor infinito, sacrificio y confianza en mí. Sus enseñanzas y ejemplo han sido el cimiento de mis logros.

A mis hermanos, compañeros de vida, por su aliento constante y complicidad en cada paso de este camino.

A mis amigos, por su paciencia, comprensión y por brindarme momentos de alegría cuando más los necesitaba.

A todos ustedes, que han sido parte fundamental de este sueño pequeño, les dedico este trabajo con profundo cariño y gratitud.

Wagner Servio Diaz Sarango

Agradecimiento

Ante todo, agradezco a Dios por ser la pieza fundamental en mi vida, por guiarme en cada paso y brindarme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

Y también quiero expresar mi más sincero agradecimiento, a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Al Laboratorio de Suelo, Agua y Bromatología de la Universidad Nacional de Loja, por brindarme las herramientas y el espacio necesario para desarrollar mi investigación. Su apoyo ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

A mis amigos, quienes me acompañaron y apoyaron incondicionalmente durante la fase de campo. Su ayuda y compañía hicieron que este proceso fuera más llevadero y enriquecedor.

A la carrera de Ingeniería Ambiental, por formarme como profesional y proporcionarme los conocimientos necesarios para enfrentar los desafíos ambientales de nuestro tiempo.

Gracias a todos por ser parte de este importante capítulo de mi vida académica y profesional.

Wagner Servio Diaz Sarango

Índice de contenidos

Portada	I
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Índice de anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	6
4.1. Alteraciones en la cobertura de suelo.....	6
4.2. Alteraciones en la cobertura/uso del suelo, y sus consecuencias	7
4.2.1. Factores y direcciones del cambio de usos de suelo	8
4.2.2. El Carbono: Elemento Clave en los Procesos Biogeoquímicos Terrestres	9
4.2.3. Dinámica del Ciclo del Carbono en los Ecosistemas Terrestres	9
4.3. Causas o elementos que influyen en las reservas de carbono edáfico.....	10
4.4. Captura de carbono.....	11
4.5. Marco legal.....	11
5. Metodología	14
5.1. Zona de estudio	14
5.2. Metodología para el primer objetivo: Determinar el contenido de carbono orgánico edáfico sobre áreas de pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón.....	14

5.2.1.	Muestras de suelo	15
5.2.2.	Fase de laboratorio	16
5.2.3.	Densidad aparente	17
5.3.	Metodología para el segundo objetivo: Establecer comparaciones del contenido de carbono orgánico edáfico bajo tres tipos de uso de suelo: pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón.	18
5.3.1.	Análisis estadístico	18
6.	Resultados	21
6.1.	Resultado del objetivo 1: Determinar el contenido de carbono orgánico edáfico sobre áreas de pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón	21
6.1.1.	Calicatas	21
6.1.2.	Densidad aparente	24
6.1.3.	Porcentaje de Carbono orgánico y Materia orgánica	24
6.1.3.	Carbono orgánico en el suelo (COS) almacenado por hectárea.....	25
6.2.	Resultado des objetivo 2: Establecer comparaciones del contenido de carbono orgánico edáfico bajo tres tipos de uso de suelo: pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón	27
6.2.1.	Validación de Supuestos para comparación de variables.....	27
6.2.2.	Comparación de las variables analizadas	28
7.	Discusión	32
8.	Conclusiones	34
9.	Recomendaciones	35
10.	Bibliografía	36
11.	Anexos	41

Índice de tablas:

Tabla 1. Fórmulas utilizadas para calcular la cantidad de materia orgánica y el porcentaje de carbono orgánico en las muestras de suelo provenientes de la microcuenca San Simón, ubicada en el sector El Carmen.....	16
Tabla 2. Fórmulas utilizadas para calcular la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico del suelo (por hectárea).	17
Tabla 3. Tabla de resumen de las pruebas de estadística empleadas en el análisis de datos...	18
Tabla 4. Descripción de los suelos de la microcuenca San Simón en función de sus horizontes edafológicos.	22
Tabla 5. Densidad aparente (Da) de los tres diferentes usos de suelo de la microcuenca San Simón	24
Tabla 6. Valores porcentuales de carbono orgánico y materia orgánica presentes en las muestras de suelo (bosque, pastizal y cultivos) de la microcuenca San Simón.	25
Tabla 7. Contenido de carbono orgánico presentes en los tres usos de suelo de la microcuenca San Simón	26
Tabla 8. Evaluación de la distribución normal del contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo de la microcuenca San Simón.	27
Tabla 9. Prueba de homogeneidad de varianzas del almacenamiento COS en los tres tipos de uso de suelo de la microcuenca San Simón.....	27
Tabla 10. Prueba de independencia de observaciones del contenido COS en los tres tipos de uso de suelo de la microcuenca San Simón.....	28
Tabla 11. Coeficiente de Variación de Carbono Orgánico del Suelo según Uso de Suelo en la Microcuenca San Simón.....	30

Índice de figuras:

Figura 1. Ubicación del área de estudio, microcuenca San Simón. 14

Figura 2. Horizontes edafológicos de los usos de suelo en la microcuenca San Simón mediante calicatas. 22

Figura 3. Cantidad de carbono orgánico presente en el suelo correspondiente a tres tipos de uso de suelos en la microcuenca San Simón..... 26

Figura 4. Análisis comparativo del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) entre distintos usos, mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0,05. 29

Figura 5. Box-Plot del almacenamiento de COS de la microcuenca San Simon..... 31

Índice de anexos:

Anexo 1. Usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo.....	41
Anexo 2. Muestreo de la capa orgánica del suelo en los tres usos de suelo, ubicadas en la microcuenca San Simón.	41
Anexo 3. Recolección de muestras de suelo edáfico con barreno (compuestas).	42
Anexo 4. Mezcla, homogenización y pesaje de 1lb de las muestras compuestas de suelo edáfico.	42
Anexo 5. Mezcla, homogenización y pesaje de 1lb de las muestras compuestas de suelo edáfico.	42
Anexo 6. Tamizado de las muestras compuestas de suelo edáfico.	43
Anexo 7. Proceso de secado de las muestras no disturbadas.	44
Anexo 8. Fase de titulación con los reactivos para el cálculo de materia orgánica.	45
Anexo 9. Base de datos de la densidad aparente de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).....	46
Anexo 10. Registro de datos del porcentaje de carbono y la materia orgánica obtenidos de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).	47
Anexo 11. Registro de datos del contenido carbono orgánico de suelo edáfico obtenidos de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).	47
Anexo 12. Certificado de traducción del resumen	47

1. Título

Evaluación de carbono orgánico edáfico bajo distintos usos de suelo de la microcuenca San Simón, cantón Loja

2. Resumen

La microcuenca San Simón, en el sector Carmen de Loja, es vital para el almacenamiento de carbono. Sin embargo, la conversión de bosques en tierras agrícolas y ganaderas ha comprometido este importante servicio ecosistémico, alterando la funcionalidad ambiental de la zona. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) en tres usos de suelo (bosque, cultivo y pastizal) dentro de la microcuenca San Simón. En cada uso de suelo, se delimitó 1 hectárea y se tomaron muestras a 15 cm de profundidad: 6 muestras no disturbadas para medir densidad aparente, y 3 muestras compuestas para analizar materia orgánica y carbono orgánico. Para realizar el procesamiento estadístico se usó los programas informáticos SPSS e InfoStat. De acuerdo a los hallazgos del estudio revelaron que la zona de la microcuenca San Simón contiene un total de 315,24 tC ha⁻¹, distribuida de manera diferencial según el uso del suelo: el bosque alberga 117,94 tC ha⁻¹, los cultivos 107,08 tC ha⁻¹, y los pastizales 90,22 tC ha⁻¹, y en cuanto a la densidad aparente del suelo, se observó que los terrenos dedicados al cultivo y bosque presentaron valores mínimos, mientras que el área de pastizal registró un valor máximo. No obstante, el estudio reveló que la relación entre el porcentaje de carbono y la materia orgánica alcanzó su nivel mínimo en las áreas destinadas a pastizal. Y el análisis comparativo reveló diferencias estadísticamente significativas en el contenido COS, entre los usos de suelo estudiados, estas variaciones se atribuyen a factores ambientales (temperatura, humedad, altitud, precipitación), características edáficas y prácticas como el sobrepastoreo. El bosque mostró mayor un contenido de COS, en comparación a los otros usos de suelo. Igualmente, las propiedades físicas (densidad aparente) y químicas (carbono orgánico, materia orgánica) del suelo, incidieron en el contenido de COS en la zona de la microcuenca.

Palabras clave: carbono orgánico; materia orgánica; propiedades físicas y químicas.

Abstract

The San Simón micro-watershed area, located in El Carmen - Loja, is vital for carbon storage. However, the conversion of forests into agricultural and livestock lands has compromised this important ecosystem service, altering the environmental functionality of the area. The main objective of this research was to evaluate COS (soil organic carbon) storage in three land uses (forest, crop, and pasture) within the San Simón micro-watershed. In each land use, one hectare was delineated, and samples were taken at a depth of 15cm: 6 undisturbed samples to measure bulk density, and 3 composite samples to analyze organic matter and organic carbon. For statistical processing, SPSS and InfoStat software were used. According to the study's findings, the San Simón micro-watershed area contains a total of 315.24 tC ha⁻¹, distributed differently depending on land use: the forest holds 117.94 tC ha⁻¹, crops 107.08 tC ha⁻¹, and pastures 90.22 tC ha⁻¹. Regarding soil bulk density, it was observed that areas dedicated to crops and forests showed lower values, while the pasture area recorded a maximum value. However, the study revealed that the relationship between carbon percentage and organic matter reached its minimum in pasture areas. The comparative analysis showed statistically significant differences in COS content among the studied land uses, which can be attributed to environmental factors (temperature, humidity, altitude, precipitation), soil characteristics, and practices such as overgrazing. The forest showed a higher COS content compared to other land uses. Likewise, the physical (bulk density) and chemical (organic carbon, organic matter) properties of the soil influenced COS content in the micro-watershed area.

Keywords: organic carbon; organic matter; physical and chemical properties.

3. Introducción

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero por las actividades humanas es una de las fundamentales causas del calentamiento global, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura son las principales fuentes de estas emisiones (NCAR, 2022; IPCC, 2022). Para mitigar el cambio climático es esencial la conservación de los ecosistemas terrestres, como los suelos de bosque, que actúan como sumideros de carbono naturales (Pérez et al, 2022). Este tipo de suelos de bosques, que cubren el 29% de las tierras, son los ecosistemas terrestres que almacenan más carbono, los árboles y el suelo forestal contienen el 60% y el 36% del carbono de la vegetación terrestre y del suelo edáfico, respectivamente por ello, el manejo y uso de suelo en bosques es esencial para la conservación del carbono y la mitigación del cambio climático a nivel mundial (Charro et al, 2008).

A nivel global los suelos de bosque son esenciales para la salud del planeta, albergan una gran cantidad de biodiversidad, proporcionan secuestro de carbono y una regulación hídrica (Fedele et al., 2021). Sin embargo, los bosques están desapareciendo rápidamente por degradación del suelo, se estima que se perdieron 10 millones de hectáreas de suelo boscoso cada año entre el 2015 y 2020 (FAO y PNUMA, 2020). Y desde 1970, se han perdido aproximadamente 900.000 km² de suelos de entornos arbóreos en la Amazonía sudamericana, lo que representa una disminución del 15% de la cobertura mundial del uso de suelo forestal y la pérdida se debe a la conversión de suelos a usos antropogénicos, como la agricultura, la ganadería y la urbanización (Amigo, 2020; Fearnside, 2005).

En Ecuador, la situación de la deforestación por la expansión de la frontera agrícola y pastizales es sumamente alarmante, se estima que alrededor del 70% de las emisiones de CO₂ se derivan del rápido deterioro del suelo en bosques, que abarca una extensión de 70.000 hectáreas anuales (SENPLADES, 2013). Esta tendencia ha llevado a que el país sea identificado como el líder en perturbación en bosques en América Latina, habiendo sufrido el desgaste de suelo de aproximadamente 1.9 millones de hectáreas en bosque nativo durante las últimas tres décadas (Valdez y Cisneros, 2020).

En la provincia de Loja, se evidencia un patrón preocupante, entre los años 2000 y 2008, se reportó un promedio anual de 3.678 hectáreas de suelo de bosque perdidas debido a la deforestación (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012). En esta misma región, en el cantón

Loja, entre los años 1987 y 2016, se degradó una superficie de suelo de 218,46 hectáreas, este espacio fue ocupado por un aumento de vegetación arbustiva, pastizales, suelos antrópicos y, sobre todo, por un aumento significativo de suelos descubiertos, perdiendo la capacidad de almacenamiento de carbono inicial, estos problemas ambientales se encuentran presentes en el bosque de la microcuenca San Simón (Samaniego, 2021).

Este estudio analizó el contenido de carbono orgánico del suelo en tres usos de suelo (bosque, cultivo y pastizal) dentro de la microcuenca San Simón. Para determinar cómo difiere la capacidad de almacenamiento de COS según el tipo de cobertura.

Por esta razón, el propósito de esta investigación consistió en evaluar el almacenamiento de COS de la microcuenca San Simón, para lo cual se ha planteado los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el contenido de carbono orgánico edáfico sobre áreas de pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón
- Establecer comparaciones del contenido de carbono orgánico edáfico bajo tres tipos de uso de suelo: pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón

4. Marco Teórico

4.1. Alteraciones en la cobertura de suelo

En la actualidad, las principales transformaciones en la cobertura del suelo son ocasionadas por las intervenciones humanas, las cuales buscan alterar la superficie terrestre con el fin de satisfacer necesidades personales o colectivas, tales como las actividades agrícolas (Cassman et al., 2005).

Erasso et al. (2010) entienden por cobertura del suelo al tipo de capa que recubre la superficie terrestre, ya sea de origen natural o derivada de las acciones humanas, como pastizales, cultivos, zonas urbanas, entre otros. Por otra parte, el uso del suelo hace referencia a las actividades que el ser humano desarrolla sobre un determinado tipo de cobertura, asociadas a fines sociales y económicos, tales como la agricultura comercial, la ganadería intensiva, la minería ilegal y la urbanización, entre otras. Estos cambios son el producto de complejas interacciones entre las actividades antrópicas y los procesos ambientales (Calamari et al., 2013).

El cambio de uso del suelo conlleva la modificación de la cubierta terrestre, reemplazando un tipo de cobertura por otra distinta (DeFries et al., 2004; Henríquez, 2012). Este fenómeno se cuantifica a través de la transición de una categoría de cobertura terrestre a otra diferente, como por ejemplo la expansión de las áreas agrícolas, la deforestación o el crecimiento de las zonas urbanas (Cassman et al., 2005).

Álvarez y Agredo (2013) identifican diversos factores que contribuyen a la pérdida de la cobertura vegetal, algunos de los cuales obedecen a las condiciones naturales y a los procesos evolutivos del territorio, mientras que otros se vinculan con las actividades antrópicas. A continuación, se detallan algunos de estos factores que resaltan dicha problemática:

Falta de una planificación que integre los procesos político-administrativos y las particularidades ecosistémicas y ambientales de la zona.

- Movimientos migratorios o desplazamientos de población.
- Escasez de terrenos aptos para la urbanización.
- Incremento demográfico por altas tasas de natalidad.
- Topografía con pronunciadas pendientes.

- Desarrollos urbanos espontáneos sin planificación previa.
- Urbanizaciones en suelos no aptos para ello.
- Deficiencias en el control urbano por parte del Estado.
- Regímenes de precipitaciones que superan los niveles pluviométricos habituales.
- Actividades agrícolas y ganaderas en laderas.

4.2. Alteraciones en la cobertura/uso del suelo, y sus consecuencias

Durante las últimas décadas, el cambio global ha propiciado una serie de transformaciones relevantes en los ecosistemas terrestres, principalmente a causa de la modificación de la cobertura del suelo, su degradación y el uso más intensivo del mismo. Estos procesos, comúnmente englobados bajo los términos deforestación o degradación forestal, han generado impactos ecológicos significativos a diversas escalas (Bocco et al., 2001).

Para entender correctamente estos procesos, es fundamental distinguir entre los conceptos de "cobertura" y "uso del suelo". La cobertura del suelo se refiere a las superficies naturales o artificiales que recubren la tierra, las cuales pueden ser de origen natural, como bosques, sabanas o lagunas, o bien creadas y mantenidas por la acción humana. (Bocco et al., 2001).

Además, el uso del suelo surge de los asentamientos y actividades productivas que definen el aprovechamiento de las tierras para satisfacer las necesidades humanas, como la agricultura, el establecimiento de zonas urbanas, la construcción de presas, entre otros. Las particularidades del uso del suelo se derivan de la interacción entre factores físicos y naturales, así como de factores culturales y antropogénicos (Bocco et al., 2001).

Uno de los principales retos que afrontan los ecosistemas naturales es la transformación en el uso de la tierra, lo que ha provocado la disminución de hábitats, la desaparición de especies y la merma de la biodiversidad (Vincent et al., 2019). Adicionalmente, el empleo de sustancias químicas contaminantes en actividades agrícolas y zonas urbanas compromete la calidad del agua y del suelo, generando la compactación de este último y alteraciones en los ciclos hídricos, atmosféricos y abundancia de nutrientes (Alexander et al., 2017; Lawrence et al., 2016; van Asselen y Verburg, 2013).

A lo largo de la revolución industrial y el crecimiento demográfico humano, estas influencias antropogénicas se han vuelto aún más notorias (Yang et al., 2015). Por ejemplo, los usos agrícolas y ganaderos contribuyen con más del 18% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. La ganadería, especialmente, se ha convertido en uno de los subsectores agrícolas de más rápido crecimiento en países en desarrollo, lo que ha llevado a un aumento considerable de CO₂ atmosférico (Peter H. Verburg et al., 2011).

Hoy en día, el cambio en el uso del suelo sigue siendo un aspecto relevante y un desafío significativo debido a los procesos de conversión de tierras forestales en áreas agrícolas, transformación de pastizales en zonas industriales y reemplazo de vegetación nativa por plantaciones y expansión agrícola (Manuschevich y Beier, 2016; Miranda et al., 2017).

La pérdida de vegetación nativa o cambios en la sucesión ecológica en cada país o región están determinados por factores biofísicos específicos del paisaje, como la calidad del suelo, la topografía, los incendios, el clima y aspectos fitosanitarios, así como menciona Miranda et al., (2017). Por otro lado, el crecimiento de los cultivos está influenciado por las condiciones edáficas y climáticas locales, así como las decisiones políticas que mejoran el uso del suelo en respuesta a mercados locales y globales. Por tanto, el cambio en el uso del suelo en una zona particular está relacionado con procesos socioeconómicos y biofísicos que también mejoran la mano de obra y estimulan el comercio (van Asselen y Verburg, 2013).

4.2.1. Factores y direcciones del cambio de usos de suelo

En la actualidad, los impactos ecológicos más significativos se encuentran vinculados a la comprensión de las transformaciones que experimentan los paisajes a lo largo del tiempo. Por esta razón, las investigaciones se han centrado en el desarrollo de modelos de simulación dinámica que buscan replicar los posibles patrones de evolución de un paisaje y evaluar sus futuras implicaciones ecológicas (Soares-Filho et al., 2002). Estas simulaciones de cambio en el uso del suelo pueden llevarse a cabo mediante un enfoque prospectivo, basado únicamente en tendencias pasadas, o a través de la introducción de escenarios alternativos, como nuevas políticas ambientales o la construcción de carreteras (Pérez-Vega et al., 2012).

Para predecir con certeza los efectos del cambio en el uso del suelo, es necesario realizar adecuadamente los procesos de modelación y calibración para obtener resultados eficientes.

Por lo tanto, es fundamental estudiar el comportamiento de los patrones pasados de uso del suelo y, bajo ciertos supuestos, generar conclusiones que puedan demostrar adecuadamente los cambios (van Vliet et al., 2013). Estas dinámicas están influenciadas tanto por factores biofísicos como socioeconómicos. Por ejemplo, las áreas urbanas, debido a su alta inversión inicial, son menos propensas a cambiar a corto plazo, al igual que los usos agrícolas como viñedos, olivos u otros frutales, que se vuelven rentables después de varios años y suelen mantenerse a largo plazo (Hurtt et al., 2011; van Vliet et al., 2013).

Las plantaciones forestales, por su parte, se renuevan cada 10 a 15 años, se ofrecen períodos de descanso de suelo cortos. En cuanto a los usos relacionados con áreas naturales, su cambio está influenciado por factores biofísicos como pendiente y exposición, los cuales tienden a cambiar poco a corto plazo de manera natural, a menos que haya una influencia antrópica externa que modifique este uso (Hurtt et al., 2011).

4.2.2. El Carbono: Elemento Clave en los Procesos Biogeoquímicos Terrestres

El carbono es un elemento químico fundamental en los compuestos orgánicos y se halla presente en diversos medios del planeta, como los océanos, el suelo y la atmósfera, los cuales constituyen los principales reservorios y fuentes emisoras de carbono a nivel planetario (Pontevedra et al., 2004).

La interacción de procesos de naturaleza química, física y biológica resulta fundamental para definir las relaciones entre estos reservorios o depósitos de carbono, posibilitando así el intercambio de carbono entre la atmósfera y la superficie terrestre mediante mecanismos como la fotosíntesis, la respiración y la emisión de gases (Burbano, 2018).

Los estudios en esta área han evidenciado que la disponibilidad de carbono en el planeta no es ilimitada, y han dilucidado cómo este elemento circula en distintas escalas espaciales y temporales, desde el nivel molecular hasta el organísmico y global, abarcando también diferentes escalas de tiempo (Jaramillo, 2004).

4.2.3. Dinámica del Ciclo del Carbono en los Ecosistemas Terrestres

El ciclo del carbono implica el flujo de este elemento a través de procesos de índole física, química y biológica, los cuales ocurren en diferentes reservorios terrestres como la

atmósfera, la hidrosfera, la biosfera, la rizosfera y la litosfera (Martín, 2010). Durante los procesos de fotosíntesis y la actividad microbiana, el carbono orgánico presente en la atmósfera es fijado y transformado en carbohidratos, los cuales constituyen una fuente energética para las plantas. A su vez, el dióxido de carbono es liberado a través de las hojas o raíces de los vegetales, mientras que en los animales esta emisión ocurre mediante procesos metabólicos. Asimismo, la descomposición de materia orgánica vegetal y animal devuelve dióxido de carbono a la atmósfera (Orellana et al., 2012).

En el suelo tiene lugar un proceso conocido como respiración edáfica, en el cual la producción de dióxido de carbono se destaca como un indicador de la tasa de descomposición de la materia orgánica presente en el suelo (MOS). El análisis de estos parámetros permite comprender la contribución del suelo al equilibrio de CO₂ en la atmósfera (Lessard et al., 2006)

4.3. Causas o elementos que influyen en las reservas de carbono edáfico

Las reservas de carbono orgánico presentes en el suelo se ven influenciadas por diversos factores tales como las condiciones climáticas, la naturaleza de los residuos orgánicos, la estructura edáfica, la textura del suelo, la composición mineralógica y el uso que se le da al terreno (Houghton et al., 1999). De acuerdo con diversas investigaciones, los factores que ejercen un mayor grado de influencia sobre las reservas de carbono edáfico son las condiciones climáticas y el uso que se le da al suelo, mientras que el resto de los factores analizados presentan una influencia e importancia relativamente menor (Hontoria et al., 2004).

Las condiciones climáticas representan un factor de impacto significativo sobre la composición edáfica, al incidir en el tipo de cobertura vegetal, la producción de biomasa y la actividad microbiana en el suelo, aspectos que se encuentran directamente vinculados con los niveles de materia orgánica presentes (Montaño et al., 2016). En regiones de clima frío, la materia orgánica tiende a acumularse debido a los procesos de humificación, mientras que en zonas áridas con escasa cobertura vegetal, predominan los procesos de mineralización, lo cual conlleva a menores concentraciones de materia orgánica en el suelo (Ibáñez, 2006).

El uso del suelo también tiene un impacto significativo en el contenido de carbono orgánico, dependiendo de las prácticas de manejo implementadas. La implementación de prácticas que promueven la fijación de carbono puede tener una relevancia aún mayor que el

simple cambio en el uso del suelo (IPCC, 2000). Entre las prácticas que contribuyen a incrementar las reservas de carbono orgánico en el suelo se encuentran la labranza cero o mínima, el uso de coberturas vegetales, el control de los procesos erosivos, la aplicación de fertilizantes, los sistemas agroforestales y un adecuado manejo del pastoreo (Hontoria et al., 2004).

4.4. Captura de carbono

El suelo y la biomasa desempeñan un rol trascendental en la captura y almacenamiento del carbono proveniente del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, contribuyendo así a su inmovilización dentro del ciclo biogeoquímico (López et al., 2013). La importancia de los suelos y la biomasa como reservorios de carbono es ampliamente reconocida por la comunidad científica (Macías et al., 2018).

El secuestro de carbono conlleva múltiples beneficios ambientales, entre los que se encuentran una mejora en la calidad edáfica, un aumento en la estabilidad de los agregados del suelo, mayor resistencia a los procesos erosivos, incremento de la capacidad de retención de agua y nutrientes, mayor actividad biológica y un aumento en la biodiversidad de los organismos presentes en el suelo (Michel, 2001).

4.5. Marco legal

4.5.1. Constitución de la Republica del Ecuador: Aspectos Legales sobre Suelos

En la Constitución de la Republica del Ecuador (2008), el **Art.396** plantea que “El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño. En caso de duda sobre el impacto ambiental de alguna acción u omisión, aunque no exista evidencia científica del daño, el Estado adoptará medidas protectoras eficaces y oportunas”. Además **Art.405** establece que “El sistema nacional de áreas protegidas garantizará la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas. El sistema se integrará por los subsistemas estatal, autónomo descentralizado, comunitario y privado, y su rectoría y regulación será ejercida por el Estado. El Estado asignará los recursos económicos necesarios para la sostenibilidad financiera del sistema, y fomentará la participación de las comunidades, pueblos y nacionalidades que han habitado ancestralmente las áreas protegidas en su administración y gestión”.

De igual forma **Art.406** manifiesta que “El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros”. Y también establece **Art.407** que “Se prohíbe la actividad extractiva de recursos no renovables en las áreas protegidas y en zonas declaradas como intangibles, incluida la explotación forestal. Excepcionalmente dichos recursos se podrán explotar a petición fundamentada de la Presidencia de la República y previa declaratoria de interés nacional por parte de la Asamblea Nacional, que, de estimarlo conveniente, podrá convocar a consulta popular”.

Finalmente **Art.414** nos habla que “El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo”.

4.5.2. Código orgánico ambiental: Normativas y Consideraciones para el Suelo

El código orgánico del ambiente (2017) nos dice que, el **Art.276**, número 4, de la “Constitución de la República del Ecuador, establece que uno de los objetivos del régimen de desarrollo será recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural”.

Por otra parte, el **Art.409** de la “Constitución de la República del Ecuador declara que es de interés público y prioridad nacional la conservación del suelo, en especial su capa fértil. Se establecerá un marco normativo para su protección y uso sustentable que prevenga su degradación, en particular la provocada por la contaminación, la desertificación y la erosión. En áreas afectadas por procesos de degradación y desertificación, el Estado desarrollará y estimulará proyectos de forestación, reforestación y revegetación que eviten el monocultivo y utilicen, de manera preferente, especies nativas y adaptadas a la zona”.

Además, el **Art.415** de la “Constitución de la República del Ecuador dispone que el Estado Central y los gobiernos autónomos descentralizados, deberán adoptar políticas integrales y participativas de ordenamiento territorial urbano y de uso de suelo, que permitan regular el

crecimiento urbano, el manejo de la fauna urbana e incentiven el establecimiento de zonas verdes”.

Por último, el **Art.106** nos avisa de “Planes para la conservación del bosque natural. Los planes para la conservación del bosque natural son instrumentos de zonificación, formulados por el Estado o propuestos por los propietarios de las tierras, según sea el caso, para realizar de forma individual, colectiva o asociativa, actividades productivas sostenibles y con ello evitar el cambio de uso de suelo y la deforestación de los bosques naturales existentes en dichas tierras”.

5. Metodología

5.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en la microcuenca San Simón, ubicada en el sector Zamora Huayco, cantón y provincia de Loja (Figura 1), la cual tiene una extensión de 1.117,08 hectáreas y abarca altitudes que varían desde los 2.332 msnm hasta los 3.426 msnm (Zárate, 2011). La temperatura media es de 15.3 °C y la precipitación media mensual es de 1.100 mm. La pendiente promedio es de 55.2%, y su forma tiende a ser ovalada-redonda (Zárate, 2011).

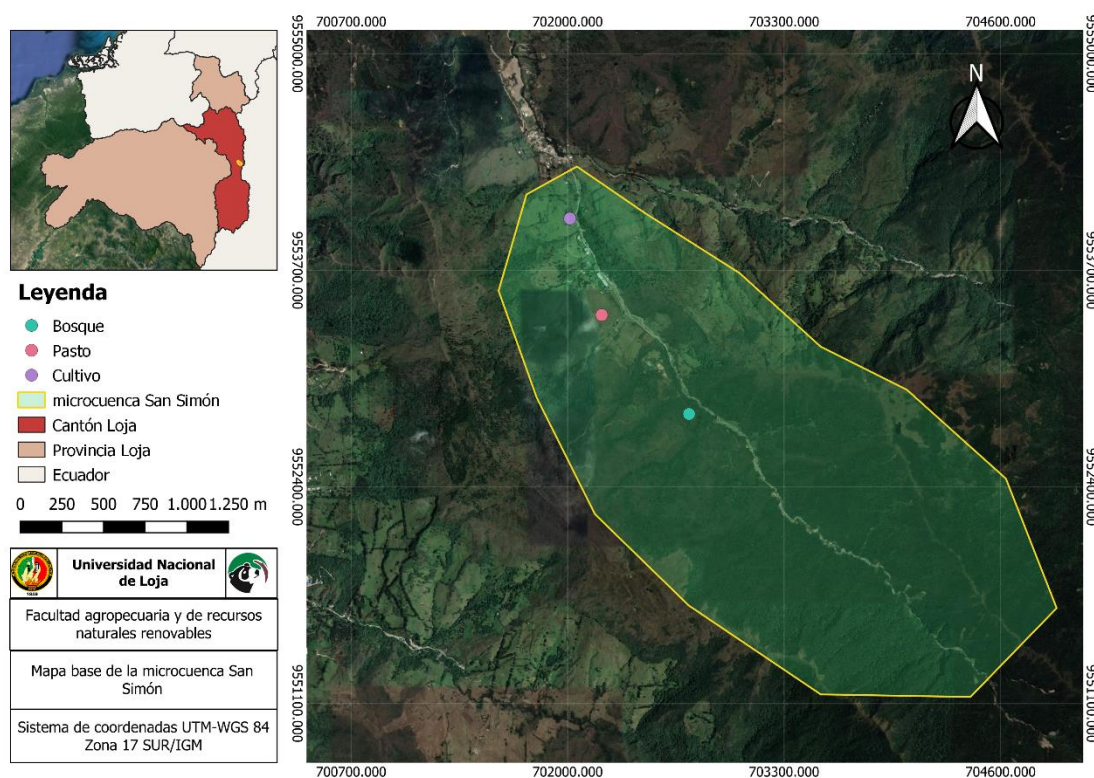


Figura 1. Zona de estudio, microcuenca San Simón.

5.2. Metodología para el primer objetivo: Determinar el contenido de carbono orgánico edáfico sobre áreas de pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón.

El estudio se llevó a cabo en el área de El Carmen, con el propósito de analizar el contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo del ecosistema de la microcuenca San Simón, este análisis se centró en mediciones cuantitativas y evaluaciones estadísticas. Este estudio se caracterizó por su diseño transeccional, ya que los datos son recolectados en un único momento. Su naturaleza en conexión tuvo la intención de establecer comparaciones entre la

variable dependiente, el COS, y los distintos tipos de uso de suelo, como pastizales, cultivos y bosques, que se consideran variables independientes. La metodología utilizada tuvo un enfoque deductivo, lo que pudo conducir a una comprensión más profunda de los fenómenos estudiados, y es importante destacar que este estudio es no experimental, ya que no se realizaron manipulaciones de variables en el proceso de investigación (Hernández et al., 2014; Torres et al., 2021).

Para la investigación, se establecieron tres áreas de estudio de dimensiones 4 metros por 25 metros, cada una representando distintos tipos de uso de suelo: pastizales, cultivos y bosques, cada una con una extensión de una hectárea. Se empleó un diseño estratificado para la disposición de las unidades de muestreo, utilizando los tres tipos de uso de suelo como estratos.

Por otro lado, con el fin de asegurar la representatividad del estudio sobre el almacenamiento de COS, se llevaron a cabo tres repeticiones dentro de cada unidad de muestreo, generando un total de nueve muestras compuestas de suelo perturbadas. Estas muestras se obtuvieron mediante la combinación de cinco submuestras recolectadas en cada punto de muestreo siguiendo un patrón en zigzag. Además, para determinar la densidad aparente de cada unidad de muestreo, se realizaron seis repeticiones por cada tipo de uso de suelo, sumando un total de 18 muestras no perturbadas.

5.2.1. Muestras de suelo

Se realizó una recolección de muestras siguiendo un diseño aleatorio, tal como fue sugerido por Duval et al., (2014), con tres usos de suelo: pastizales, cultivos y bosque. Cada uso se hizo replicando tres veces, obteniendo un total de nueve muestras de suelo. En este trabajo de investigación, se utilizaron muestras mezcladas recolectadas en diversos puntos, tomando en cuenta la relevancia de definir unidades experimentales que compartieran características homogéneas (mediante visitas in situ) en cuanto al uso del suelo y la conformación topográfica, esto se realizó con el propósito de prevenir cualquier posible distorsión o sesgo en los tratamientos aplicados (Carvajal y Andrade, 2021).

Para caracterizar los suelos de los diferentes usos seleccionados, se realizaron calicatas de 1m³ en cada zona de muestreo. El objetivo fue identificar los horizontes edáficos y estimar el tiempo de formación del suelo en cada tipo de cobertura. Las calicatas fueron etiquetadas

como A, B y C para diferenciar los suelos bajo pastizal, cultivo y bosque respectivamente (Figura 2). Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de las características del suelo visibles en las calicatas o perforaciones exploratorias. Empleando la guía de colores Munsell, se determinaron los matices y la conformación estructural presentes en las tres categorías de uso de terreno o suelo: pastizales, cultivo y bosque, durante el trabajo de campo realizado.

5.2.2. Fase de laboratorio

Las muestras de tierra extraídas del área de estudio fueron trasladadas a las instalaciones del Laboratorio de Suelos, Aguas y Bromatología de la Universidad Nacional de Loja (UNL). Posteriormente, se procedió a desecar las muestras, separarlas utilizando un tamiz de 0.25 mm de diámetro del orificio y pesarlas en una balanza analítica con precisión de 0.1 g. Para cuantificar el contenido de materia orgánica y determinar el porcentaje de COS correspondiente a los diferentes usos de suelo de la microcuenca San Simón, ubicada en el sector El Carmen, se aplicó la metodología propuesta por Walkley y Black (1947).

La elección de este método para el estudio se debió a su bajo costo de implementación, la rapidez para obtener una evaluación aproximada y por ser el enfoque más recomendado para este tipo de investigaciones, según lo indicado por Echeverría et al., (2018). El fundamento de la metodología radica en la oxidación del carbono orgánico presente en el suelo, mediante una solución de dicromato de potasio 1 N ($K_2Cr_2O_7$) y el calor liberado por la reacción con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Con el fin de mitigar la interferencia causada por los iones férricos (Fe^{3+}), se incrementó la adición de ácido ortofosfórico concentrado (H_3PO_4). Del mismo modo, para cuantificar los remanentes de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), se realizó una valoración con sulfato ferroso ($FeSO_4$). Adicionalmente, se utilizó el factor de Van Bemmelen (1,72) para el cálculo del porcentaje de carbono orgánico.

A partir de los procedimientos mencionados, en la Tabla 1 se presentan las fórmulas empleadas para determinar la cantidad de materia orgánica y el porcentaje de carbono orgánico presente en las muestras de suelo analizadas.

Tabla 1. Fórmulas utilizadas para calcular la cantidad de materia orgánica y el porcentaje de carbono orgánico en las muestras de suelo provenientes de la microcuenca San Simón, ubicada en el sector El Carmen.

Parámetro	Ecuación
-----------	----------

Materia orgánica	$MO (\%) = \frac{(V_o - V) * N * 0.39 * 1.72 * 1.1}{(PM)}$
Porcentaje de carbono orgánico	$\%C = \frac{(V_o - V) * N * 0.39}{(PM)}$

V_o = volumen consumido durante la titulación del blanco; **V** = volumen utilizado en la titulación de la muestra; **N** = normalidad precisa del sulfato de hierro; **0,39** es el peso químico del C; **1,72** = constante para transformar el carbono a materia orgánica, bajo el supuesto de que la materia orgánica contiene 58% de carbono en la mayoría de suelos encontrados en Ecuador; **1,1** es un factor de corrección del 10% (C a MO); **PM** = peso de la muestra.

Fuente: *Formulación propia, basada en la metodología propuesta por Walkley & Black (1947).*

5.2.3. Densidad aparente

Para cuantificar la densidad aparente (*Da*) en las muestras de suelo, se recurrió al método del cilindro o anillo volumétrico, fundamentado en el principio analítico de la densidad aparente. Se empleó un equipo de barrenación, compuesto por un barreno de característica Uhland para la extracción de muestras inalteradas, junto con un set de cilindros biselados. Esta metodología ha sido recomendada para estudios relacionados con el almacenamiento de COS realizado por Torres et al., (2021). Primero se tomó el peso de las muestras de suelo en su estado natural o húmedo, utilizando una balanza analítica de precisión, luego, dichas muestras fueron sometidas a un proceso de secado en un horno a 105°C durante un periodo de 24 horas.

En la Tabla 2 se muestran las fórmulas utilizadas para determinar la densidad aparente y cuantificar el contenido de COS por unidad de superficie, expresado en hectáreas.

Tabla 2. *Fórmulas utilizadas para calcular la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico del suelo (por hectárea).*

Parámetro	Ecuación
<i>Da</i> (Densidad aparente)	$Da \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{PCS - PCV}{VC}$
COS (ha ⁻¹)	$COS = \%C * da * ps * 100$

PCV indica el Peso del cilindro en vacío; **VC** indica el Volumen del cilindro; **PCS** indica el Peso del cilindro en seco; **COS** indica el carbono orgánico en el suelo, expresado en toneladas por hectárea; **%C** indica el porcentaje de carbono; **ps** indica la profundidad del suelo medida en metros; **da** indica la densidad aparente del suelo.

Fuente: *Formulación propia, fundamentada por Torres et al., (2021).*

5.3. Metodología para el segundo objetivo: Establecer comparaciones del contenido de carbono orgánico edáfico bajo tres tipos de uso de suelo: pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón.

En el trabajo, se llevó a cabo un análisis de supuestos lo que permitió confirmar las condiciones necesarias para realizar comparaciones válidas entre los tres usos de suelo en la microcuenca San Simón: bosque, pastizales y cultivo. Se verificó la normalidad de los datos (prueba de Shapiro-Wilk), la homogeneidad de varianzas (prueba de Levene) y la independencia de las variables (prueba de Chi-cuadrado). Dado que la variable COS se consideró paramétrica, se aplicó un análisis de varianzas (ANOVA con comparación de variables con letras) de una vía, permitiendo la comparación de las medias de más de dos poblaciones. Para este análisis, los tres usos de suelo se considerarán como el factor de comparación (variable cualitativa) (Rubio y Berlanga, 2012; Valenzuela y Visconti 2018).

5.3.1. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de datos se llevó a cabo pruebas estadísticas que se muestran en la Tabla 3, describiendo su finalidad, hipótesis, fórmulas utilizadas y regla de rechazo, tal como se menciona en el estudio realizado por Barrezueta (2021).

Tabla 3. *Tabla de resumen de las pruebas de estadística empleadas en el análisis de datos.*

Estadísticos	Descripción	Hipótesis	Fórmula	Regla de rechazo
Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks)	La prueba de Shapiro-Wilks se emplea para verificar si los datos siguen una distribución normal.	H0: Los datos siguen una distribución normal. H1: Los datos no siguen una distribución normal	$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)}$ Donde a_i son coeficientes que dependen de la media y la covarianza de la distribución normal esperada, x_i son los datos ordenados, y \bar{x} es la media.	Rechazar H0 si $p < 0.05$.
Prueba de Homogeneidad (Levene)	Esta prueba se utiliza para verificar la homogeneidad de varianzas entre los grupos.	H0: Las varianzas de los grupos son iguales. H1: Las varianzas de los grupos no son iguales.	$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} * \frac{\sum_{i=1}^k N_i (Z_i - Z_{...})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_i)^2}$ Donde $Z = Y_{ij} - \bar{Y}_i $, Y_{ij} es el valor observado, \bar{Y}_i es la media del grupo i , y N es el tamaño total de la muestra.	Rechazar H0 si $p < 0.05$.
Prueba de Independencia (Chi-cuadrado)	Se usa para evaluar la independencia entre dos variables categóricas.	H0: Las variables son independientes. H1: Las variables no son independientes.	$X^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$ Donde O_i es la frecuencia observada y E_i la frecuencia esperada.	Rechazar H0 si $p < 0.05$.
Prueba HSD de Tukey	Esta prueba se usa para hacer comparaciones post-hoc cuando ANOVA detecta diferencias significativas.	H0: No hay diferencias significativas entre las medias de los grupos i y j . H1: Hay diferencias significativas entre las medias de los grupos i y j .	$q = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_j}{\sqrt{\frac{MSE}{n}}}$ Donde \bar{X}_i y \bar{X}_j son las medias de los grupos i y j , MSE es el error cuadrático medio, y n es el tamaño de las muestras.	Rechazar H0 si $p < 0.05$ entre dos grupos específicos.

Comparación de Variables con Letras (ANOVA)	La técnica de comparación de variables con letras agrupa las medias de los diferentes grupos (pastizales, cultivos y bosque) en conjuntos representados por letras.	H0: Las medias del contenido de COS en pastizales, cultivos y bosques son iguales ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$). H1: Al menos una media difiere ($\mu_i \neq \mu_j$ para al menos un par (i,j)).	Las medias se agrupan por letras, donde las medias que comparten la misma letra no son significativamente diferentes entre sí. Por ejemplo: A, B, AB.	Si dos grupos tienen letras distintas, se rechaza H0, indicando diferencias significativas entre esos grupos.
---	---	--	---	---

Todos los análisis se llevaron a cabo utilizando los softwares InfoStat y SPSS en la actualización 2021, tal como se detalla en el trabajo de investigación realizado por Torres et al. (2021). Basado en la información proporcionada, se plantearon los siguientes supuestos o suposiciones:

H0: Las medias del contenido de COS de los pastizales, cultivos y bosques no presentan diferencias significativas, es decir, las medias son iguales ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$).

H1: Al menos una de las medias del contenido de COS de los pastizales, cultivos y bosques difiere significativamente de las demás, es decir, existen medias diferentes ($\mu_i \neq \mu_j$) para al menos un par de grupos (i, j).

6. Resultados

6.1. Resultado del objetivo 1: Determinar el contenido de carbono orgánico edáfico sobre áreas de pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón

Para determinar el contenido orgánico del suelo se obtuvo lo siguiente: calicatas, Da y porcentaje de MO y C dichos resultados se describen a continuación:

6.1.1. Calicatas

La Figura 2 presenta los resultados obtenidos de las muestras de suelo recolectadas a través de calicatas en diferentes tipos de uso del suelo. En los usos de pastizal (B) y cultivo (C), se identificaron los horizontes edafológicos A y B. El horizonte A (Subhorizontes: A1, A2) es el más superficial y se caracteriza por su acumulación de materia orgánica, mientras que el horizonte B (Subhorizontes: B1, B2) es más profundo y se caracteriza por su color oscuro y alta concentración de minerales como calcita, illita y feldespatos. En el caso del bosque (A), se identificaron los horizontes O, A y B.

El horizonte O es el más superficial y se caracteriza por su alta concentración de materia orgánica, principalmente en forma de hojarasca y raíces. La formación de este horizonte es posible en el bosque gracias a la presencia de árboles, los cuales aportan una gran cantidad de materia orgánica al suelo. En cambio, en los usos de pastizal y cultivo, la formación de este horizonte es imposible debido a los procesos antrópicos, como el pastoreo de ganado y el arado del suelo, que remueven la materia orgánica superficial.

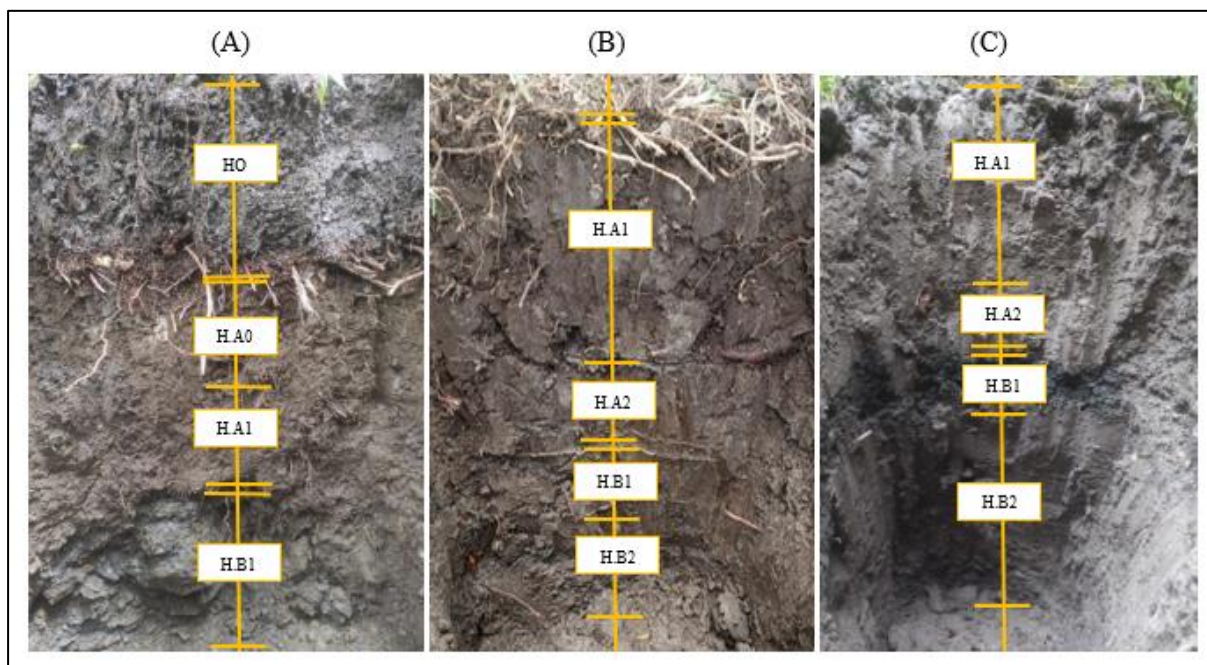


Figura 2. Horizontes edafológicos de los usos de suelo en la microcuenca San Simón mediante calicatas.

Los suelos destinados a pastizal y cultivo, que han sido intervenidos por el ser humano, presentan un mayor grado de desarrollo genético que los suelos de bosque, que no han sido intervenidos. Este mayor grado de desarrollo se refleja en un mayor contenido de materia orgánica y un color más oscuro. En la Tabla 3 se muestran los datos recopilados en campo a partir de las calicatas realizadas, incluyendo la descripción de los diferentes horizontes o capas del suelo identificadas.

Tabla 4. Descripción de los suelos de la microcuenca San Simón en función de sus horizontes edafológicos.

Uso de suelo Bosque	
Horizonte	Descripción
H.O	Profundidad: 0-27,9 cm Nombre color húmedo: grayish olive Matiz: 7.5 Y (5/2) Características: un horizonte orgánico con un contenido moderado de materia orgánica. Su color claro indica que tiene un bajo grado de desarrollo genético.
H.A1	Profundidad: 28-46 cm Nombre color húmedo: Brown Matiz: 7.5 YR (4/3) Características: el color oscuro observado corresponde a la presencia de materia orgánica en el suelo. Cuanto más oscuro sea el horizonte superficial o capa superior del suelo, mayor será la concentración de materia orgánica que contiene.

H.A2	<p>Profundidad: 46-62 cm Nombre color húmedo: brownish gray Matiz: 5 YR (6/1) Características: el suelo presenta un color gris parduzco, esto es un indicador de que el suelo cuenta con un buen drenaje natural, permitiendo un adecuado flujo de agua a través del mismo.</p>
H.B1	<p>Profundidad: 62-100 cm Nombre color húmedo: light gray Matiz: 7.5 Y (7/1) Características: por general presenta este tipo de color el suelo que tiene problemas de drenaje.</p>

Uso de suelo Pastizal

Horizonte	Descripción
H.A1	<p>Profundidad: 0-38 cm Nombre color húmedo: brownish gray Matiz: 10 RY (5/1) Características: el suelo de este color tiende a ser seco, esto se debe probablemente a los efectos del pisoteo por ganado vacuno.</p>
H.A2	<p>Profundidad: 38-60 cm Nombre color húmedo: dull yellowish Brown Matiz: 10 RY (5/3) Características: es un suelo inmaduro que consiste en pequeñas porciones de tierras finas y humos introducidos, por lo general se lo considera así por los efectos de la erosión.</p>
H.B1	<p>Profundidad: 60-82 cm Nombre color húmedo: dull yellowish Brown Matiz: 10 YR (4/3) Características: el suelo de este color representa un marrón amollento opaco ya que en el suelo es un indicador de la presencia de materia orgánica, minerales oscuros, pH alcalino y sequedad.</p>
H.B2	<p>Profundidad: 82-100 cm Nombre color húmedo: Brown Matiz: 10 YR (4/4) Características: este color brown presenta características de un alto contenido de materia orgánica tienden a ser de color más oscuro, y el color marrón es uno de los colores más comunes de la materia orgánica.</p>

Uso de suelo Cultivo

Horizonte	Descripción
H.A1	<p>Profundidad: 0-31 cm Nombre color húmedo: gray Matiz: 5 Y (5/1) Características: el color gris observado en el suelo es una característica asociada a suelos pantanosos o encharcados, donde el nivel freático o capa de agua subterránea se encuentra a menos de 25 centímetros de profundidad.</p>
H.A2	<p>Profundidad: 3-49 cm Nombre color húmedo: grayish olive Matiz: 5 Y (5/2) Características: este color grisáceo oliva presenta característica se debe a la presencia de minerales como el hierro y el manganeso.</p>

H.B1	Profundidad: 49-67 cm Nombre color húmedo: olive black Matiz: 10 Y (3/1) Características: este color olive black de suelo es común en los cultivos de secano, que se cultivan en terrenos que no reciben riego regular.
H.B2	Profundidad: 67-100 cm Nombre color húmedo: yellowish gray Matiz: 2.5 YR (5/1) Características: El color grisáceo observado en el suelo podría ser un indicio de la existencia de ciertos minerales en su composición, tales como el cuarzo, las micas y los feldespatos.
Capa orgánica (H.O); Capa mineral superior (H.A), subdividida en A1 y A2; Capa mineral intermedia (H.B), subdividida en B1 y B2	

6.1.2. Densidad aparente

La Tabla 4 muestra los valores obtenidos para la densidad aparente para tres tipos de uso del suelo de la microcuenca San Simón: cultivo, pastizal y bosque, el suelo edáfico del bosque muestra la menor densidad aparente con una valoración mínima de 1,09 g/cm³ y una media de 1,10 g/cm³, indicando una menor compactación, en cambio, el pastizal exhibe valores más altos, con un mínimo de 1,12 g/cm³ y una media de 1,30 g/cm³, revelando una mayor compactación debido al pisoteo de animales bovinos y vacunos. Este procedimiento genera un suelo con una mayor alteración en su conformación estructura (Hofstede et al., 2014).

Tabla 5. Densidad aparente (*Da*) de los tres diferentes usos de suelo de la microcuenca San Simón.

Variable	Unidad	Uso de suelo	Max	Min	Media	D.E.	CV
Da	g/cm ³	Bosque	1,20	1,09	1,10	0,06	5
		Pastizal	1,27	1,12	1,30	0,08	6,92
		Cultivo	1,31	1,25	1,20	0,03	2,69

Da: Densidad aparente; **Max:** Valor máximo; **Min:** Valor mínimo; **D.E.:** Desviación estándar; **CV:** Coeficiente de variación

6.1.3. Porcentaje de Carbono orgánico y Materia orgánica

Para el porcentaje de carbono de los tres usos de suelo de la microcuenca San Simón, basándonos en los resultados de la Tabla 5, el suelo edáfico de pastizal muestra un valor mínimo porcentual de 6,78% y una media de 6,99% esta situación se atribuye a consecuencia de la baja o escasa actividad enzimática de los microorganismos responsables de la degradación de la

materia orgánica, a diferencia del suelo edáfico utilizado para el cultivo, donde se registra un porcentaje máximo de carbono de 9,21% y una media de 9,09%, esta se vincula con la aportación extra de abonos orgánicos empleados en el crecimiento del cultivo.

Según los datos obtenidos, el suelo utilizado como pastizal en la microcuenca San Simón (Tabla 5) mostró el porcentaje más bajo de materia orgánica con un 13,20%, asociado a un mínimo contenido de carbono. Por otra parte, el suelo de uso forestal o bosque registró el mayor porcentaje de materia orgánica, alcanzando un 19,70%. Este valor se relaciona por la inmensa cantidad de microorganismos que viven dentro de los bosques. La información del porcentaje de carbono y MO de los tres usos de suelo edáfico se encuentra detallada en el Anexo 11.

Tabla 6. Valores porcentuales de carbono orgánico y materia orgánica presentes en las muestras de suelo (bosque, pastizal y cultivos) de la microcuenca San Simón.

Variable	Unidad	Uso de suelo		
		Bosque	Pastizal	Cultivo
CO	%	10,39	6,99	9,09
MO		19,70	13,20	17,20

Materia orgánica (MO); Carbono Orgánico (CO).

6.1.3. Carbono orgánico en el suelo (COS) almacenado por hectárea

Con respecto a los valores presentados para el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en los tres diferentes usos de suelo edáfico en la microcuenca San Simón (Tabla 7), se destaca que el uso de suelo bosque presenta la mayor concentración de COS con 122,90 tnC. ha⁻¹ y presentando una media promedio de 117,94 tnC. ha⁻¹, gracias a su conservación en el ecosistema, diferente a esto, el uso de suelo pastizal muestra valores mínimos de concentración de COS de 86,43 tnC. ha⁻¹ y una media de 90,22 tnC. ha⁻¹, ya que en esta zona se destina a la cría de animales domésticos como parte de la actividad humana.

La variación en el contenido de carbono presente en el suelo se encuentra influenciada por la densidad aparente, así como por los porcentajes de carbono y materia orgánica correspondientes al uso del terreno, al ser factores estrechamente relacionados con los procesos de desarrollo y formación genética de los suelos (Anexo 11).

Tabla 7. Contenido de carbono orgánico presentes en los tres usos de suelo de la microcuenca San Simón

Variable	Unidad	Uso de suelo	Max	Min	Media	CV	D.E.
COS	tC. ha ⁻¹	Bosque	122,9	113,34	117,94	4,06	4,79
		Pastizal	95,24	86,43	90,22	5,02	4,53
		Cultivo	114,76	103,2	107,08	6,21	6,65

COS: Carbono orgánico del suelo; **Max:** Valor máximo; **Min:** Valor mínimo; **D.E.:** Desviación estándar; **CV:** Coeficiente de variación

En relación al estudio de contenido de carbono orgánico en la microcuenca San Simón (Figura 3) se encontró que los tres usos de suelo analizados (pastizal, cultivo y bosque) almacenan cantidades diferentes de carbono. El pastizal almacena 90,22 tC. ha⁻¹, el cultivo almacena 107,08 tC. ha⁻¹ y el bosque almacena 117,94 tC. ha⁻¹, esto equivale a un almacenamiento total de 315,24 tC. ha⁻¹, lo que equivale a una media general de 105,08 tC. ha⁻¹ en la microcuenca San Simón.

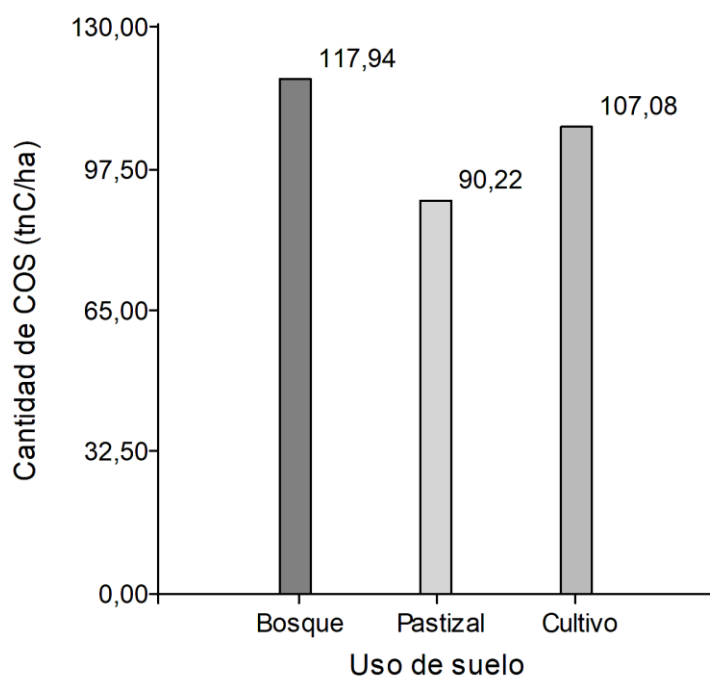


Figura 3. Cantidad de carbono orgánico presente en el suelo correspondiente a tres tipos de uso de suelos en la microcuenca San Simón.

6.2. Resultado des objetivo 2: Establecer comparaciones del contenido de carbono orgánico edáfico bajo tres tipos de uso de suelo: pastizal, cultivos y bosque de la microcuenca San Simón

6.2.1. Validación de Supuestos para comparación de variables

6.2.1.1. Normalidad

Mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks, adaptada para un conjunto de datos con un tamaño muestral menor o igual a 50 ($n \leq 50$), se evaluó la distribución de los valores de carbono orgánico en los primeros 0,15 metros de profundidad del suelo, correspondientes a los usos de pastizal, cultivo y bosque en el área de la microcuenca San Simón. Donde los datos del contenido de la variable COS exhibieron una distribución normal, con un valor p de 0,45 en el nivel de significancia, superando el nivel de significancia (0,05) establecido para el estudio, por consiguiente, la variable COS mostró un comportamiento normal o paramétrico.

Tabla 8. Evaluación de la distribución normal del contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo de la microcuenca San Simón.

Variable	Unidad	n	W*	Media	D.E	P (Unilateral D)
COS	tC. ha	9	0,91	157,62	19,46	0,4514

n: Tamaño de la muestra; **D.E:** Desviación Estándar; **W*:** Estadístico calculado; **P:** Nivel de significancia

6.2.1.2. Homogeneidad de varianzas

Igualmente, por medio de la prueba de Levene se verificó si las dispersiones de almacenamiento de COS/ha por ha en los tres tipos de uso de suelo, eran estadísticamente significativas. Los resultados de la prueba revelaron un valor de $p = 0.56$ indicando que no hubo diferencias significativas en las dispersiones, sugiriendo una uniformidad en la variabilidad entre los tres tipos de uso de suelo. Este hallazgo respalda la aplicabilidad del análisis de varianza (comparación de variables), al confirmar la homogeneidad de los datos con un alfa mayor a 0,05, fortaleciendo así la confianza en la interpretación de las diferencias observadas y minimizando posibles sesgos derivados de divergencias en las dispersiones.

Tabla 9. Prueba de homogeneidad de varianzas del almacenamiento COS en los tres tipos de uso de suelo de la microcuenca San Simón.

Variable	Unidad	n	R ²	P (α)
----------	--------	---	----------------	----------------

Residuos. ABS de COS	tC. ha	9	0,17	0,56
Número de datos (n); Coeficiente de determinación (R ²); Significancia (P).				

6.2.1.2. Independencia de observaciones

Del mismo modo, el valor obtenido de la prueba chi cuadrado para el contenido de COS en la microcuenca San Simón fue de p igual a 0,32 con un nivel de significancia de 0,05, este resultado indica que no hay una relación significativa entre las observaciones de los tres usos del suelo estudiados. En otras palabras, la aplicación de la prueba sugiere que las observaciones son independientes entre sí, respaldando la idea de que las variaciones en el contenido COS no están influenciadas por los diferentes usos del suelo en la microcuenca. Estos hallazgos fortalecen la comprensión de la dinámica del suelo en relación con los usos estudiados.

Tabla 10. Prueba de independencia de observaciones del contenido COS en los tres tipos de uso de suelo de la microcuenca San Simón.

Variable	Unidad	Estadístico	Valor	gl	P (α)
COS	tC. ha	Chi Cuadrado Pearson	18,00	16	0,32
Grados de libertad (gl); Significancia (P).					

6.2.2. Comparación de las variables analizadas

Se evaluó la variación del contenido de COS en tres usos del suelo: pastizal, cultivo y bosque. Se utilizó el análisis de varianza (Comparación de las variables) para determinar si existían diferencias significativas entre los tres usos del suelo. El p-valor del análisis de varianza fue de 0,0022, lo que indica que existen diferencias significativas en al menos un par de los tres usos del suelo. Para identificar las diferencias específicas entre los tres usos del suelo, Se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, considerando un nivel de significancia de 0,05. Respectivamente con planteamiento de la hipótesis nula y alterna para su análisis:

H0: El contenido de COS de los pastizales, cultivo y el bosque no tienen ninguna variación de medias significativas, es decir, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$.

H1: El contenido de COS de los pastizales, cultivo y el bosque si tienen variación entre medias significativas, es decir, $\mu_i \neq \mu_j$ para al menos un par (i,j).

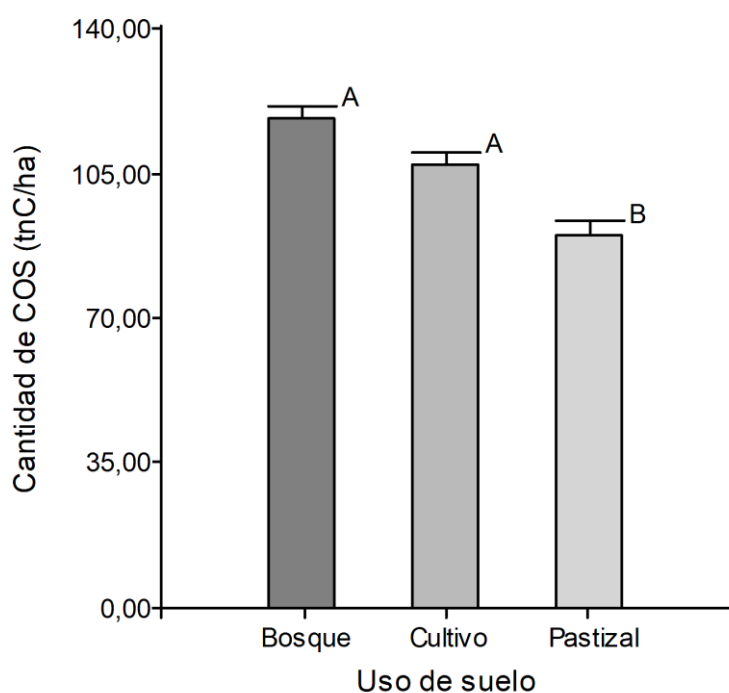


Figura 4. Análisis comparativo del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) entre distintos usos, mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0,05.

Se aplicó la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas en las medias del contenido de COS entre tres tipos de suelo. Los resultados de la Figura 4, respaldan la hipótesis alternativa (H1), indicando al menos una diferencia significativa entre las medias (media con letra diferente). Dicha variación guarda relación con las diferencias en el nivel de desarrollo genético de los suelos analizados, donde las zonas de mayor altitud tienden a presentar un contenido más elevado de COS.

Los suelos de mayor altitud suelen tener un mayor contenido de COS, debido a que la descomposición de la materia orgánica es más lenta en condiciones frías y húmedas. Los bosques tienen una mayor densidad de vegetación que los pastizales y los cultivos, lo que conduce a una mayor acumulación de materia orgánica, los cultivos en cambio también pueden contribuir al aumento del contenido de COS, ya que la incorporación de residuos vegetales al suelo puede aumentar la cantidad de materia orgánica disponible. Los pastizales, por otro lado, pueden perder materia orgánica debido al pastoreo intensivo existente en la zona.

El coeficiente de variación (CV) del contenido de COS en los usos de suelo bosque, cultivo y pastizal de la microcuenca San Simón fue de 4,06%, 6,21% y 5,02%, respectivamente. Estos valores son considerados bajos, según la clasificación de Gordon y Camargo (2015), que establece que un CV inferior al 30% indica una homogeneidad de los datos. Los resultados obtenidos demuestran que el contenido de COS de cada uso de suelo tiene una baja dispersión. Esta afirmación sugiere que el promedio calculado a partir de los datos recopilados durante el trabajo de campo es una medida representativa del conjunto completo de observaciones realizadas.

Tabla 11. *Coeficiente de Variación de Carbono Orgánico del Suelo según Uso de Suelo en la Microcuenca San Simón.*

Variable	Unidad	Uso de suelo	n	Media	CV	Mediana
COS	tC. ha ⁻¹	Bosque	3	117,94	4,06	117,59
		Pastizal	3	90,22	5,02	89,00
		Cultivo	3	107,08	6,21	103,29
Cantidad de observaciones (n); Coeficiente de Variación (CV).						

En la Figura 5 se presenta el análisis Box-Plot del contenido de COS. Los usos de suelo cultivo y bosque tuvieron un contenido de COS más abundante que el uso de suelo pastizal, el cual presentó una media de menor porcentaje de COS. El 100% de los datos de los tres usos de suelo se distribuyen por encima de la mediana, 117,59 tnC. ha⁻¹, 103,29 tnC. ha⁻¹ y 89,00 tnC. ha⁻¹ respectivamente. Adicionalmente, los valores de carbono orgánico del suelo en las áreas de cultivo exhibieron una mayor variabilidad en comparación con las zonas boscosas y de pastizales.

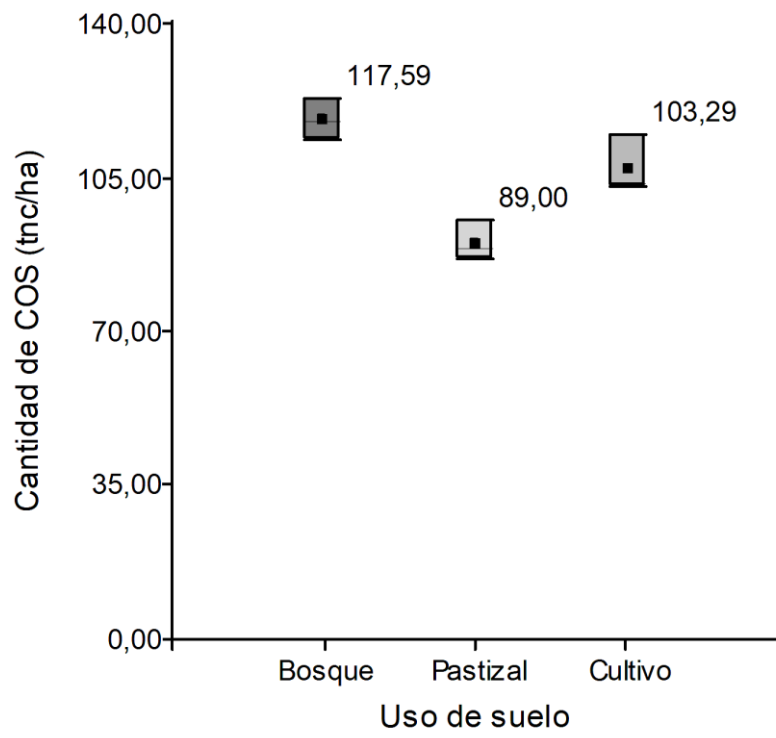


Figura 5. *Box-Plot del almacenamiento de COS de la microcuenca San Simón.*

7. Discusión

Debido a la heterogeneidad del COS, su cuantificación representa un desafío crucial. Esta investigación analizó muestras de bosque, pastizal y cultivo para determinar y comparar sus reservas de COS (tnC/ha). Se buscó evidenciar diferencias significativas de COS entre usos de suelo, ya que según Fearnside (2005) actividades agrícolas, ganaderas, crecimiento demográfico y cambios de uso afectan las reservas edáficas de COS en bosques. Combinando muestreo de campo y análisis de laboratorio se logró cuantificar y comparar con mayor precisión las reservas de COS entre los distintos usos de suelo evaluados.

Los hallazgos del presente estudio resaltan el significativo potencial de los suelos bajo cobertura boscosa en la microcuenca San Simón para almacenar carbono orgánico, alcanzando un acumulado total de 315,24 tnC/ha. Se observó que el contenido de COS fue significativamente mayor en el uso de suelo bosque seguido del cultivo y diferenciándose ambos del pastizal. Esto es comparable con investigaciones previas que evaluaron el contenido de COS en diferentes usos de suelo. Cabrera (2023) encontró cantidades más altas de COS (461,75 tnC/ha) en suelos de páramo en comparación con los resultados del presente estudio. Esto sugiere que los ecosistemas de páramo tienen una gran capacidad para almacenar carbono orgánico debido a sus condiciones de alta humedad. Por otro lado, Rojas (2023) reportó cantidades de COS en sistemas agroforestales (485,95 tnC/ha). Aunque se observan diferencias numéricas entre los estudios, las cantidades son del mismo orden de magnitud entre los distintos usos de suelo analizados.

Los resultados obtenidos concuerdan con estudios previos al mostrar que el bosque es el mayor reservorio de COS (117,94 tnC/ha), seguido del cultivo (107,08 tnC/ha) y finalmente el pastizal (90,22 tnC/ha). Esto concuerda con el estudio de Rojas (2023), donde la biomasa arbórea registró mayor contenido de carbono en los pisos altitudinales medio y bajo (132,96 y 118,81 tnC/ha respectivamente), en comparación a necro masa y suelo. Del mismo modo, Cabrera (2023) reportó los valores más elevados de COS almacenado (164,06 tC/ha) en zonas de cobertura natural no intervenida y bajas en las intervenidas (pastizal y cultivo de papa).

En relación al suelo en el contenido de COS, los valores de densidad aparente (D_a) obtenidos en el presente estudio para bosque (1,10 g/cm³), pastizales (1,30 g/cm³) y cultivos (1,20 g/cm³) evidencian diferentes grados de compactación edáfica según el uso de suelo. Estos

resultados siguen el patrón descrito por Rojas (2023), cual registró una mayor compactación del suelo en las zonas de menor altitud por tener mayor intervención antrópica. De igual manera, Cabrera (2023) documentó los valores más elevados de Da en pastizales, atribuyéndolo al efecto del pisoteo del ganado vacuno sobre la estructura del suelo.

El análisis comparativo de los resultados de carbono orgánico entre usos de suelo reveló diferencias significativas. El pastizal registró el menor porcentaje de carbono orgánico con un valor de 6,99%, congruente con su bajo contenido de materia orgánica de 13,20%. Por el contrario, el bosque y el cultivo presentaron los mayores porcentajes de carbono orgánico, siendo 10,39% para el bosque y 9,09% para el cultivo, lo cual se corresponde con sus altos niveles de materia orgánica de 19,70% y 17,20% respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Cabrera (2023), quien encontró que los suelos bajo cobertura forestal nativa mantienen mayor porcentaje de carbono orgánico y el más bajo encontrado en pastizal. Además, Rojas (2023) registró los valores más altos de materia orgánica y carbono en el piso medio, atribuyéndolo al suelo con dominancia de vegetación arbórea a esa altitud.

En los resultados obtenidos por Cabrera (2023) en cuanto a la evaluación del almacenamiento de COS se evidenció que no existen diferencias significativas entre los usos de suelo, en cambio en nuestra investigación, con un p-valor del análisis de varianza de 0,0022, si existen diferencias entre los usos de suelo, dando por hecho que las reservas mayores de COS en bosque y cultivo comparado al pastizal, existen por factores externos que afectan a la influencia de factores ambientales como temperatura, humedad, altitud, precipitación y a su tipo de suelo junto al sobre pastoreo, tal como señala Amundson et al., (2000) el cual la atribuye a la limitada humedad y bajas temperaturas en pastizales de altura que restringen la descomposición.

Adicionalmente, Li et al., (2019) reportaron una mayor acumulación de COS en plantaciones de árboles nativos comparadas con pastizales, atribuido a diferencias en calidad y cantidad de hojarasca, composición de raíces y condiciones microclimáticas. Y por último Abdalla et al., (2018) vincula que el sobrepastoreo por ganado vacuno reduce el carbono orgánico del suelo entre 10-60% en comparación con pastizales no pastoreados o moderadamente pastoreados, debido a la compactación del suelo y reducción de la biomasa vegetal por pisoteo animal excesivo.

8. Conclusiones

La densidad aparente del suelo fue menor bajo cobertura de bosque y cultivo, indicando un menor grado de compactación edáfica en relación a pastizal, lo cual influye en la acumulación de carbono orgánico.

El contenido de carbono orgánico del suelo de la microcuenca San Simón, estuvo estrechamente relacionado con el porcentaje de materia orgánica, siendo mayor en las coberturas de bosque.

En la microcuenca San Simón, los suelos bajo cobertura boscosa exhibieron los mayores depósitos de carbono orgánico, lo cual resalta el rol clave que desempeñan los ecosistemas forestales en el secuestro y reservorio de carbono edáfico.

Las divergencias observadas en las reservas de carbono orgánico del suelo entre los diferentes usos de la tierra se deben principalmente a las condiciones ambientales y propiedades edáficas particulares de cada tipo de cobertura vegetal evaluada en la microcuenca, se constató la existencia de diferencias en el contenido de COS, registrándose mayores cantidades en las áreas boscosas y de cultivo en comparación con los pastizales, este último presentó niveles bajos debido a las menores temperaturas y al sobrepastoreo por el ganado vacuno, factores que limitan la actividad microbiana encargada de la descomposición de la materia orgánica.

9. Recomendaciones

Se recomienda implementar prácticas de manejo enfocadas a incrementar el contenido de carbono orgánico en suelos agrícolas y de pastoreo, como rotación de cultivos, aplicación de compost y estiércol, reducción de labranza, entre otras.

Es necesario promover la conservación y expansión del uso de suelo de bosque en la microcuenca, dado su efectividad como sumidero de carbono edáfico frente a otros usos de suelo.

Se sugiere desarrollar estudios complementarios para evaluar la dinámica temporal del carbono orgánico bajo los distintos usos de suelo en la zona, y para reducir la compactación del suelo se recomienda también implementar sistemas silvopastoriles y un manejo controlado de la carga animal en las áreas de pastoreo.

Se propone ampliar la investigación a otras microcuencas con similares usos de suelo para determinar la influencia relativa de factores ambientales en las reservas de carbono orgánico.

10. Bibliografía

- Africano, K., Cely, G., & Serrano, P. (2016). Potencial de captura de CO₂ asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 91–110.
- Aguirre, Z. (2012). Biodiversidad Ecuatoriana. Universidad Nacional de Loja. Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Loja, Ecuador.
- Alexander, P., Prestele, R., Verburg, P. H., Arneith, A., Baranzelli, C., Batista e Silva, F., Brown, C., Butler, A., Calvin, K., Dendoncker, N., Doelman, J. C., Dunford, R., Engström, K., Eitelberg, D., Fujimori, S., Harrison, P. A., Hasegawa, T., Havlik, P., Holzhauser, S., ... Wang, Y. P. (2017). Assessing uncertainties in land cover projections. *Global Change Biology*, 23(2), 767–781.
- Amigo, I. (2020). When will the Amazon hit a tipping point? *Nature*, 578, 505–507.
- Ayala, L., Villa, M., Aguirre, Z., & Aguirre, N. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. *Cedamaz*, 4(1).
- Barrezueta, S. (2021). Efecto de diversos atributos topográficos sobre el carbono orgánico en varios usos del suelo. *Revista Ciencia UNEMI*, 14(35), 43–53.
- Bocco, G., Mendoza M. & Masera, O. (2001). La Dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación.
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35, 82–96.
- Carrillo, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265(0168–1923), 30–47.
- Carvajal, B. N., & Andrade, H. J. (2021). Carbono orgánico en suelos con diferentes sistemas de uso en Tacarimena Yopal, Colombia. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), 1–9.

- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L., & De Bièvre, B. (2014). Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos.
- Defries, R. S., Foley, J. & Asner, G., (2004). Landuse choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 2, n. 5, pp. 249-257.
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*, 37(2), 227–240.
- Echeverría, M., Mur, R. J., Lindao, V., Erazo, N., Logroño, W., & Córdova, R. (2018). Quantification of organic carbon stored in the soil in the paramo of Igualata, Chimborazo province-Ecuador. *AIP Conference Proceedings*, 2003(August).
- Fearnside, P. M. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. *Conservation Biology*, 19, 680–688.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and United Nations Environment Program (UNEP). (2020). *The state of the world's forests: forests, biodiversity and people*. Food and Agriculture Organization.
- Giddens, A., y del Bustillo, F. M. (2010). *La política del cambio climático* (No. 363.73874 G5). Madrid: Alianza.
- González, É., & Meira, P. (2020). Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles Educativos*, 42(168), 157–174.
- Henriquez Dole, L. E. (2012). Escenarios futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de la mancha oriental. Universidad Politécnica de Valencia, 1– 190.
- Hofstede, R. (1995). Effects of livestock farming and recommendations for management and conservation of páramo grasslands (Colombia). *Land Degradation & Development*, 6(3), 133–147.
- Hofstede, R. (1999). El páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los páramos andinos ¿Qué Sabemos? 16–17.
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). *Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos* (Global Pea).

- Hofstede, RGM, Suárez, GM y Stucchi, M. (2014). Cambio de uso de suelo en Páramo y sus implicaciones para las reservas de carbono y los servicios ecosistémicos. En *Sistemas Interconectados de Monitoreo y Gestión Ambiental* (pp. 97-124). Springer, Dordrecht.
- Hontoria, C., Rodríguez, J. C., & Saa, A. (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España Peninsular. *Edafología*, 11, 149–157.
- Houghton, R. A., Hackler, J. L., & Lawrence, K. T. (1999). The U.S. Carbon Budget: Contributions from Land-Use Change. *Science*, 285, 574–578.
- Hurt, G. C., Chini, L. P., Frolking, S., Betts, R. A., Feddema, J., Fischer, G., Fisk, J. P., Hibbard, K., Houghton, R. A., Janetos, A., Jones, C. D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Klein Goldewijk, K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., ... Wang, Y. P. (2011). Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109(1), 117–161.
- IPCC, (International Panel Climate Change). (2014). Summary for policymakers. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. WG II AR5*. Cambridge University Press, 32 p.
- Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del carbono. In Instituto Nacional de Ecología (Ed.), *Cambio climático: una visión desde México* (Primera ed, pp. 76–84).
- Lambin, Eric F., B.L.Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, Arild Angelsen, John W. Bruce, Oliver T. Coomes, Rodolfo Dirzo, Gunther Fischer, Carl Folke, P.S. George, Katherine Homewood, Jacques Imbernon, Rik Leemans, Xiubin Li, Emilio F. Moran, Michael Mortimore, P.S. Ramakrishnan, John F. Richards, Helle Skanes, Will Steffen, Glenn D. Stone, Uno Svedin, Tom A. Veldkamp, Coleen Vogel y, Jianchu Xu. (2001). «The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths». *Global Environmental Change* 11: 261–269.
- Lessard, R., Gignac, D., & Rochette, P. (2006). El ciclo del carbono: Midiendo el flujo del CO₂ del suelo.
- Lopez, M., Poch, R., & Porta, J. (2013). *Edafología: Uso y protección de suelos* (Mundi-Prensa (ed.); 3er ed.). https://www.todostuslibros.com/libros/edafologia-uso-y-proteccion-de-suelos_978-84-8476-661-2

- Macías, F., Camps, M., & Rodríguez, L. (2018). Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia. *Recursos Rurales*, 1, 71–85. <https://doi.org/10.15304/rr.id5342>
- MAE. (2012). Línea base de deforestación del Ecuador continental. 26–30.
- Martín, J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 18(1), 33–46. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/33310/1/200083-267667-1-PB.pdf>
- Michel, R. (2001). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. In FAO (Vol. 96). <https://www.fao.org/publications/card/es/c/324786c6-bf3f-4ffe-986e01cf35dd0e03/>
- Montaño, N., Ayala, F., Bullock, S., Briones, O., Oliva, F., Sánchez, R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia, Y., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34, 39–59. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00039.pdf>
- Müller, U. (1999). Planificando el uso de la tierra. Catálogo de herramientas y experiencias. In: Foro de Proyectos de Desarrollo Rural y Manejo de Recursos Naturales en América Latina. GTZ. Bogotá, Co. 158 p.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR). (2022). The Greenhouse Effect and Climate Change. <https://www.ucar.edu/atmosnews/greenhouse-effect-and-climate-change>
- Orellana, G., Sandoval, M., Linares, G., García, N., & Tamariz, J. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 3(1), 123–135. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627685012>
- Ortega, J. (2021). Análisis multitemporal de cobertura y dinámica geomorfológica de la microcuenca Shucos, del cantón Loja. Piura: Universidad de Piura.
- Pérez, J., A. López, B. García, C. Díaz, M. Suárez, y S. Vargas. 2022. Ecosistemas terrestres como sumideros de carbono: oportunidades y desafíos para la mitigación del cambio climático. *Ciencia y Desarrollo* 38(2): 34-45.

- Pontevedra, X., Martínez, A., & Buurman, P. (2004). Las turberas de montaña de Galicia como sumideros de carbono. *Edafología*, 11(3), 295–307.
- Quesada, C. A. (1990). Estrategia de conservación para el desarrollo sostenible de Costa Rica. Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas. ECODES. San José, CR. 180 p.
- Rubio, M. J., & Berlanga, V. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *Revista D'Innovació i Recerca En Educació*, 5, 83–100. <https://doi.org/10.1344/reire2012.5.2527>
- SENPLADES. (2013). Sistema nacional de control forestal. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. <https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/07/CONTROL-FORESTAL.pdf>
- SENPLADES. (2013). Sistema nacional de control forestal. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/CONTROL-FORESTAL.pdf>
- Torres, E., Maza, J., & Barrezueta, S. (2021). Impacto de dos usos de suelo en el almacenamiento carbono orgánico en el Litoral Ecuatoriano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 78–85.
- Valenzuela, I. G., & Visconti, E. F. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 233–243. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining carbon in soils. Effect of variation in digestion condition and inorganic soil constituents. *Soil Sci*, 63(4), 251–264.
- Zárate, C. (2011). Hacia un modelo de ordenación para los territorios de protección natural del área de influencia inmediata de la ciudad de Loja. Tesis. Loja, Ecuador.

11. Anexos

Anexo 1. Usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo.



Anexo 2. Muestreo de la capa orgánica del suelo en los tres usos de suelo, ubicadas en la microcuenca San Simón.



Anexo 3. *Recolección de muestras de suelo edáfico con barreno (compuestas).*



Anexo 4. *Mezcla, homogenización y pesaje de 1lb de las muestras compuestas de suelo edáfico.*



Anexo 5. *Mezcla, homogenización y pesaje de 1lb de las muestras compuestas de suelo edáfico.*



Anexo 6. *Tamizado de las muestras compuestas de suelo edáfico.*



Anexo 7. *Proceso de secado de las muestras no disturbadas.*



Anexo 8. Fase de titulación con los reactivos para el cálculo de materia orgánica.



Anexo 9. Base de datos de la densidad aparente de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).

Fecha	N° lab	Cod. Campo	PC+SS	PC	SS	D.A. (g/cm3)	Promedio
3/10/2023	4264	B1P1	204,5	98,2	106,3	1,06	1,09
3/10/2023	4265	B1P2	206,7	94,9	111,8	1,12	
3/10/2023	4266	B1P3	210,1	99,1	111	1,11	1,12
3/10/2023	4267	B1P4	208,3	95,8	112,5	1,13	
3/10/2023	4268	B1P5	211,5	97,5	114	1,14	1,20
3/10/2023	4269	B1P6	221,4	95,9	125,5	1,26	
3/10/2023	4270	P1P1	225,3	97,8	127,5	1,28	1,31
3/10/2023	4271	P1P2	232,6	97,7	134,9	1,35	
3/10/2023	4272	P1P3	225,3	95,1	130,2	1,30	1,25
3/10/2023	4273	P1P4	216,3	97,4	118,9	1,19	

3/10/2023	4274	P1P5	227,9	101,1	126,8	1,27	1,31
3/10/2023	4275	P1P6	233,1	97,2	135,9	1,36	
3/10/2023	4276	C1P1	204,8	89,9	114,9	1,15	1,14
3/10/2023	4277	C1P2	208,2	94,6	113,6	1,14	
3/10/2023	4278	C1P3	227,2	96,9	130,3	1,30	1,27
3/10/2023	4279	C1P4	220	96,2	123,8	1,24	
3/10/2023	4280	C1P5	213,1	96,2	116,9	1,17	1,12
3/10/2023	4281	C1P6	206,5	99,1	107,4	1,07	

Fuente: Autor.

Anexo 10. Registro de datos del porcentaje de carbono y la materia orgánica obtenidos de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).

Fecha	Código laboratorio	Código campo	Peso Muestra	Gasto (Blanco)	Vol. Titulación	% C	%MO
17/10/2023	4264	B1R1	0,1501	10,15	6,15	10,393	19,66
17/10/2023	4266	B1R2	0,1501	10,15	6,1	10,523	19,91
17/10/2023	4268	B1R3	0,1501	10,15	6,2	10,263	19,42
17/10/2023	4270	P1R1	0,2501	10,15	5,8	6,783	12,83
17/10/2023	4272	P1R2	0,2501	10,15	5,7	6,939	13,13
17/10/2023	4274	P1R3	0,2501	10,15	5,5	7,251	13,72
17/10/2023	4276	C1R1	0,1101	10,15	7,6	9,033	17,09
17/10/2023	4278	C1R2	0,1101	10,15	7,6	9,033	17,09
17/10/2023	4280	C1R3	0,1101	10,15	7,55	9,210	17,42

Fuente: Autor.

Anexo 11. Registro de datos del contenido carbono orgánico de suelo edáfico obtenidos de los usos de suelo de la microcuenca San Simón: Bosque, Pastizal, Cultivo (laboratorio).

Código campo	Cobertura	D.A	Coordenadas UTM		P(m)	%C	%M.O.	Cantidad de COS (tnc/ha)
			Norte	Este				
B1R1	Bosque	1,09	4227,40	791030,55	0,1	10,39	19,66	113,34
B1R2		1,12	4226,88	791030,27	0,1	10,52	19,91	117,59
B1R3		1,20	4226,51	791030,00	0,1	10,26	19,42	122,90
P1R1	Pastizal	1,31	4216,22	791041,36	0,1	6,78	12,83	89,00
P1R2		1,25	4215,87	791041,12	0,1	6,94	13,13	86,43
P1R3		1,31	4215,68	791040,72	0,1	7,25	13,72	95,24
C1R1	Cultivo	1,14	4158,58	791048,94	0,1	9,03	17,09	103,20
C1R2		1,27	4158,50	791048,70	0,1	9,03	17,09	114,76
C1R3		1,12	4158,83	791048,41	0,1	9,21	17,42	103,29

Fuente: Autor.

Anexo 12. Certificado de traducción del resumen



unl

Universidad
Nacional de
Loja

Mgtr. María Patricia Rodríguez Ludeña

**DOCENTE DE LA CARRERA DE PEDAGOGÍA DE LOS IDIOMAS
NACIONALES Y EXTRANJEROS DE LA UNL**

C E R T I F I C A:

Que el documento aquí expuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular: Evaluación de carbono orgánico edáfico en la microcuenca San Simón, cantón Loja, de autoría del **Sr. Wagner Servio Diaz Sarango**, con cédula de ciudadanía **1150585923**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico y autorizo al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Loja, 15 de noviembre de 2024



Mgtr. María Patricia Rodríguez Ludeña

**DOCENTE DE LA CARRERA DE PEDAGOGÍA DE LOS IDIOMAS NACIONALES
Y EXTRANJEROS DE LA UNL**