

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**“CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO, ESTUDIOS DE LAS
FRACCIONES ORGÁNICAS Y DELTA CARBONO 13 ($\delta^{13}C$) EN DIFERENTES
TIPOS DE SUELO QUE PREDOMINAN EN EL VALLE DEL MONZÓN”**

TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:

NICOLAS SEBASTIAN TORRES UPIACHIHUA

Asesores:

CHIA WONG JULIO ALFONSO

NAVARRO VÁSQUEZ LLERME

TORIBIO DUEÑAS LEODAN

Tingo María – Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE AGRONOMÍA



Km 1.21 carretera Tingo María. Telf. (062) 561136 E.mail: fagro@unas.edu.pe.

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

N° 019-2025-FA-UNAS

BACHILLER : NICOLAS SEBASTIAN TORRES UPIACHIHUA

TÍTULO : CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO, ESTUDIOS DE LAS
FRACCIONES ORGÁNICAS Y DELTA CARBONO 13 (&13C) EN
DIFERENTES TIPOS DE SUELO QUE PREDOMINAN EN EL VALLE DEL
MONZÓN, REGIÓN HUÁNUCO

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
VOCAL : Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUOANQUI
VOCAL : M.Sc. JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES

ASESORES : Dr. JULIO ALFONSO CHIA WONG
M.Sc. LLERME NAVARRO VASQUEZ
M.Sc. LEODAN TORIBIO DUEÑAS

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 29/08/2025

HORA DE SUSTENTACIÓN : 10:00 A.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : Sala de Audiovisuales de la F.A.


CALIFICATIVO : BUENO

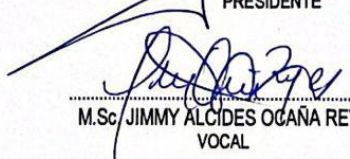
RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 29 DE AGOSTO DEL 2025


.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
PRESIDENTE


.....
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
VOCAL


.....
M.Sc. JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES
VOCAL


.....
Dr. JULIO ALFONSO CHIA WONG
ASESOR


.....
M.Sc. LEODAN TORIBIO DUEÑAS
ASESOR



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
 "Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 076 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Agronomía

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO, ESTUDIOS DE LAS FRACCIONES ORGÁNICAS Y DELTA CARBONO 13 (δ13C) EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO QUE PREDOMINAN EN EL VALLE DEL MONZÓN	NICOLAS SEBASTIAN TORRES UPIACHIHUA	09 % Nueve	Menor a 20 %

Tingo María, 09 de marzo de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

 ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
 JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**“CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO, ESTUDIOS DE LAS
FRACCIONES ORGÁNICAS Y DELTA CARBONO 13 ($\delta^{13}C$) EN DIFERENTES
TIPOS DE SUELO QUE PREDOMINAN EN EL VALLE DEL MONZÓN”**

Autor	: Nicolás Sebastian Torres Upiachihua
Asesores	: Julio Alfonso Chia Wong Llerme Navarro Vásquez Leodan Toribio Dueñas
Área de investigación	: Suelos y fertilizantes
Línea de investigación	: Fertilidad, clasificación, biología y manejo de suelos
Eje temático	: Fraccionamiento del carbono en el suelo
Lugar de ejecución	: Valle del Monzón
Duración	: 07 meses
Financiamiento	: 6 025, 80 soles
FEDU	: No
Propio	: No
Otros	: Proyecto financiado de Investigación Básica 2023- 01 (Contrato PE501083222-2023-PROCIENCIA)

Tingo María – Perú, 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

VICERRECTOR DE INVESTIGACION UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

FORMATO PARA REGISTRAR EL PROYECTO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Facultad : Facultad de Agronomía

Escuela profesional/ : Escuela Profesional de Agronomía

Departamento Académico

Título de Tesis : “Capacidad de almacenamiento de carbono, estudios de las fracciones orgánicas y delta carbono 13 ($\delta^{13}C$) en diferentes tipos de suelo que predominan en el Valle del Monzón”

Objetivo General : Evaluar la capacidad de almacenamiento de carbono, estudios de las fracciones orgánicas y delta carbono 13 ($\delta^{13}C$) en diferentes tipos de suelo que predominan en el Valle del Monzón

Autor de la Tesis : Nicolás Sebastian Torres Upiachihua

DNI : 73140992

Correo electrónico : nicolas.torres@unas.edu.pe

Asesores : Julio Alfonso Chia Wong
Llerme Navarro Vásquez
Leodan Toribio Dueñas

Área de investigación : Suelos y fertilizantes

Grupo de investigación : Investigación de Evaluación

Línea de Investigación : Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelos.

Lugar de Ejecución : Valle del Monzón,

Fecha de Inicio : Marzo, 2025

Fecha de Término : Septiembre, 2025

Presupuesto : S/. 6 025,80 soles

Financiamiento : Propio () FIF () Externo (X)

Según: Resolución: N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

DEDICATORIA

A Dios, porque lo bueno y lo malo, por lo poco y lo mucho. En él todo problema será resuelto.

A mis padres Nicolás Santos Torres Aguirre y Nancy Upiachihua Cumapa, porque siempre me brindan su cariño y fuerza.

A mi hermana Jussara Zoila Raquel Torres Upiachihua, quien a pesar de las adversidades me ha brindado su apoyo incondicional.

A mis asesores, por su paciencia y confianza en mis capacidades, su apoyo fue esencial para culminar esta tesis

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Agronomía que contribuyó en mi formación profesional.
- Al Dr. Julio Alfonso Chia Wong, M.Sc. Llerme Navarro Vásquez y M.Sc. Leodan Toribio Dueñas, mis asesores, por la colaboración y supervisión en la realización de la presente Tesis, por el apoyo de conducción y revisión académica y científica de mi trabajo científico.
- A los miembros del jurado, Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, Dr. Hugo Alfredo Huamaní Yupanqui y M.Sc. Jimmy Alcides Ocaña Reyes por su revisión, observaciones y sugerencias que ayudaron a mejorar la presente tesis.
- A todos los amigos y familiares que me apoyaron con su solidaridad, prudencia y consejos para el desarrollo de la presente tesis.
- A CONCYTEC que a través del programa PROCIENCIA, según contrato PE501083222-2023-PROCIENCIA subvencionó esta tesis.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. ¿Qué es el suelo?	3
2.1.1. Indicadores de la calidad del suelo	3
2.2. Carbono del suelo	4
2.2.1. Carbono orgánico del suelo (COS)	4
2.2.2. Almacenamiento de carbono del suelo.....	5
2.3. Técnicas de estudio de carbono en el suelo.....	6
2.3.1. Fraccionamiento Físico o Granulométrico.....	6
2.3.1.1. Carbono orgánico particulado (COP)	6
2.3.1.2. Carbono orgánico asociado a por minerales (COAM)	7
2.3.2. Carbono orgánico total del suelo (COT).....	7
2.3.3. Delta carbono 13	8
2.4. Estado del arte	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1. Lugar de ejecución	12
3.2. Material y métodos.....	14
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
4.1. Cuantificación del contenido de carbono orgánico total (COT) del suelo y el contenido de carbono orgánico proveniente de las fracciones granulométricas que son el carbono de la fracción particulada (COP) y carbono de la fracción asociada a los minerales (COAM) en base a los horizontes.....	23
4.2. Cuantificación del contenido de delta carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) en base a los horizontes con sus respectivas profundidades y la abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en base a sus órdenes.....	28
4.2.1. Inceptisols	32
4.2.2. Entisols.....	33
4.2.3. Inceptisols	34

4.3. Determinación de la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4 en base a sus horizontes y profundidad	34
4.4. Análisis y determinación de parámetros en los perfiles evaluados.	36
4.5. Determinación del análisis de componentes principales (ACP) en base a los perfiles	40
4.6. Determinación de la correlación de Pearson entre los parámetros de estudio	45
V. CONCLUSIONES	48
VI. PROPUESTAS A FUTURO	49
VII. REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Datos de clima, temperatura, precipitación, centro poblado y coordenadas UTM según los perfiles estudiados.....	13
2. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (MOAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad de orden Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06 y M07).....	25
3. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (MOAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad, con el promedio del orden Inceptisols (perfiles M09, M10, M12, M13 y M15).....	26
4. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (MOAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad, con el promedio del orden Entisols (perfiles M01, M03, M08, M11 y M14).....	27
5. $\delta^{13}C$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Inceptisols.....	29
6. $\delta^{13}C$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Inceptisols.....	30
7. $\delta^{13}C$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Entisols	31
8. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Inceptisols.....	36
9. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Inceptisols.....	37
10. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Entisols	38
11. Correlación de Pearson entre las variables carbono orgánico total (COT), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM), stock de carbono, densidad aparente (D_a), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), $\delta^{13}C$, altitud, Al, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, MO, arena, limo, arcilla y profundidad.	45

12. Correlación de Pearson entre las variables carbono orgánico total (COT), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM), stock de carbono, densidad aparente (Da), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), $\delta^{13}C$, altitud, Al, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, MO, arena, limo, arcilla y profundidad.	46
13. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Inceptisols.....	62
14. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Inceptisols.....	63
15. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Entisols	64
16. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols	65
17. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols	66
18. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Entisols.....	67
19. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Entisols.....	68
18. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de ubicación de los 15 puntos de muestreo.....	12
2. Abundancia natural $\delta^{13}\text{C}$ en base al orden Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06, M09, M10, M12, M13, M15).....	32
3. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en los perfiles Entisols (perfiles M01, M03, M08, M11 y M14).	33
4. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en el perfil Inceptisols (perfil M07)..	34
5. Composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4.....	35
6. Gráfico biplot bidimensional ACP para carbono orgánico total (COT), stock de carbono, profundidad, altitud, pH, Al, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DAP), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM) y $\delta^{13}\text{C}$. Dim 1 (componente principal 1) y Dim 2 (componente principal 2) del orden Inceptisols.	42
7. Gráfico biplot bidimensional ACP para carbono orgánico total (COT), stock de carbono, profundidad, altitud, pH, Al, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DAP), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM) y $\delta^{13}\text{C}$. Dim 1 (componente principal 1) y Dim 2 (componente principal 2) del orden Entisols.	43
8. Ficha de apoyo para la descripción y clasificación taxonómica	69
9 Muestras de suelo pesadas y codificadas.	70
10. Muestras en el agitador horizontal.	70
11. Muestras en crisol de porcelana y dentro de la estufa.....	71
12. Muestras molidas en la piedra ágata..	71
13. Muestras dentro de microtubo Eppendorf.	72
14. Muestras en el laboratorio de isotopos estables ya establecidas para el análisis isotópico.....	72
15. Micro Balanza Mettler Toledo XP6.....	73
16. Muestra de suelo dentro de la micro balanza y las capsulas de estaño utilizadas	73
17. Patrones estándar para la calibración del equipamiento de análisis isotópico (patrón de trabajo isotópico de urea C-13, N-15-5g y ciclohexanona).....	74

18. Evaluación de datos.....	74
19. Proceso de pesado de las muestras de suelo en Brasil	75
20. Evidencia fotográfica	75
21. Recolección de muestras	76
22. Explicación de calicata.....	76
23. Equipo de trabajo	77

RESUMEN

La siguiente tesis evaluó la capacidad de almacenamiento de carbono, las fracciones orgánicas y la razón isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) en diferentes tipos de suelo a través de la toposecuencia del Valle del Monzón, provincia de Huamalíes, departamento Huánuco. Analizando 15 calicatas y 81 horizontes, con muestras codificadas según el número de calicata y su horizonte (Ejemplo: M15, calicata N°15). Las variables dependientes son la capacidad de almacenamiento de carbono, el carbono orgánico particulado (COP), el carbono orgánico asociado a los minerales (COAM), carbono orgánico total (COT) y el $\delta^{13}\text{C}$, como variable independiente, el tipo de suelo. Se aplicó un diseño descriptivo no experimental, utilizando métodos de fraccionamiento granulométrico de Cambardella y Elliott (1992) y análisis isotópicos según Coplen (2011); Paul et al. (2007). Los resultados indican que el carbono está en los primeros 25 cm de suelo. El horizonte A de la calicata M15 tuvo mayor COP (67,90 g/kg) y COT (93,71 g/kg), disminuyendo con la profundidad, con valores mínimos a más de 100 cm de suelo. El $\delta^{13}\text{C}$ varió entre -15,71 ‰ y -30,57 ‰, perfiles Inceptisols mostraron carbono tipo C3 y C4, mientras que los Entisols solo C3. El análisis de componentes principales destacó correlaciones positivas entre $\delta^{13}\text{C}$, stock de carbono y COAM, así como entre profundidad, pH y Al. El análisis de correlación de Pearson mostró relación entre COT, stock de carbono, COP y COAM; de igual manera Al y CIC. El potencial para almacenar carbono es considerable, especialmente en horizontes con alto contenido de COAM.

Palabras claves: Carbono orgánico total; carbono orgánico particulado; carbono asociado a minerales; fraccionamiento granulométrico y relación isotópica.

ABSTRACT

In the following thesis the carbon storage capacity, the organic fractions and the isotopic reason ($\delta^{13}\text{C}$) of different soil type from the Monzon valley in the Huamiliés province of the Huánuco department [in Peru,] were evaluated using toposequence. Fifteen test pits and eighty one horizons were analyzed using samples [that were] coded according to the test pit numbers and the horizon (example: M15, test pit #15). The dependent variables were the carbon storage capacity, the particulate organic carbon (POC; COP in Spanish), the mineral-associated organic carbon (MAOC; COAM in Spanish), the total organic carbon (TOC; COT in Spanish), and the $\delta^{13}\text{C}$; the independent variable was the soil type. A non-descriptive experimental design was applied, using Cambardella and Elliot (1992) granulometric fractioning methods and the isotopic analysis [was done] according to Coplen (2011) [and] Paul et al. (2007). The results indicated that the carbon was in the first 25 cm of soil. The A horizon from test pit M15 had the greatest POC (67.90 g/kg) and TOC (93.71 g/kg), [which] decreased with the depth, with minimal values at more than 100 cm of soil. The $\delta^{13}\text{C}$ varied between -15.71 ‰ and -30.57 ‰, [where] Inceptisols profiles revealed C3 and C4 type carbon, while only C3 [was revealed from the] Entisols. The principal components analysis highlighted positive correlations between $\delta^{13}\text{C}$, the carbon stock and MAOC, as well as [between] the pH and Al between the depths. The Pearson correlation analysis revealed a relationship between the TOC, the carbon stock, the POC, and the MAOC; which was the same for the Al and the CEC (CIC in Spanish). The potential to store carbon was considerable, especially in horizons with a high MAOC content.

Keywords: total organic carbon, particulate organic carbon, mineral-associated carbon, granulometric fractioning, isotopic relationship

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un problema importante causado por las actividades humanas y es una responsabilidad global. El suelo es fundamental en este contexto, ya que actúa como un gran sumidero de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático.

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de los principales componentes de la materia orgánica del suelo (MOS) y su contenido es influenciado por su sistema de manejo, Steiner et al. (2011) destaca que es importante conocer sus características para determinar la permanencia y persistencia del C almacenado en el suelo. En ecosistemas naturales, el COS está en equilibrio, pero actividades humanas lo alteran, reduciendo su contenido y flujo. La medición de carbono del suelo se enfoca en convenciones internacionales, destacando métodos eficientes para su cuantificación (Watson et al., 2000). Hoy en día los métodos para la determinación de C pueden ser clasificados en orgánico e inorgánica (Nelson y Sommers, 1982). Se estudia el COS a través de fracciones usando métodos físicos, químicos y densimétricos, cabe resaltar que el presente proyecto se enfocará a nivel físico.

El fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo, propuesto por Cambardella y Elliott (1992), permite entender la dinámica del carbono mediante la separación en carbono orgánico particulado y asociado a los minerales. El COP, con partículas mayores a 53 μm , puede encontrarse libre u ocluido en los agregados, y se caracteriza por ser más lábil y susceptible a la descomposición, respondiendo de manera rápida a los cambios de manejo y a los disturbios en el suelo. En contraste, el COAM, con partículas menores a 53 μm , proviene de moléculas pequeñas como lixiviados de plantas y productos de descomposición. Esta fracción se asocia con el limo y la arcilla, tiene mayor estabilidad y ayuda a fijar carbono a largo plazo.

La relación de isótopos estables brinda información sobre compuestos en diversas condiciones ambientales. La técnica $\delta^{13}\text{C}$ se usa para estudiar sucesión vegetal, deficiencia hídrica y clima local. Esta técnica también puede ser empleada en la determinación de cambio climático por medio de análisis isotópico de CO_2 atmosférico y terrestre. Es por ello por lo que el $\delta^{13}\text{C}$ es utilizado como un índice de respuesta del ecosistema al clima y como una variable sustituta en el modelo de flujos de carbono en ecosistemas terrestres. (Moreno et al., 2017).

Ante lo manifestado, la falta de conocimiento sobre las reservas de carbono en el suelo afecta su calidad y monitoreo, crucial para buenas prácticas agrícolas. Siendo necesario entender a los componentes del paisaje (topo secuencia) pues ellos controlan esta variable ambiental que no siempre es consenso entre los distintos estudios ya realizados. El concepto de

paisaje se enfoca en la topo secuencia del valle del Monzón, integrando relieve, clases de suelo y uso de la tierra.

Por consiguiente, existe una carencia de información que repercute directamente en la zona de estudio que es el Valle de Monzón para la toma de decisiones acertadas, entonces la investigación debe tener un enfoque sobre el estudio del suelo con relación a la capacidad que tienen dichos suelos en almacenar C, por lo cual se plantea la siguiente interrogante: ¿Existirá una variación en cuanto a la capacidad de almacenamiento de C según el tipo de suelo?

La justificación de este trabajo de investigación es realizar un muestreo de suelos que pueden pertenecer a diferentes materiales de origen, estas características impactan en la capacidad de almacenamiento de C. Permitiendo contribuir a la comunidad científica y a instituciones con datos sobre el comportamiento del suelo y su relación con el ambiente, para evaluar el cambio climático y mejorar decisiones en proyectos de inversión sobre el manejo sostenible del suelo en el Valle del Monzón.

Por lo manifestado se planteó a la siguiente hipótesis, existe diferencias en la capacidad de almacenamiento de C, fracciones orgánicas y $\delta^{13}C$ en los diferentes tipos de suelo que predominan en el Valle de Monzón. Asimismo, se describe los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de almacenamiento de carbono, estudios de las fracciones orgánicas y delta carbono 13 ($\delta^{13}C$) en diferentes tipos de suelo que predominan en el Valle del Monzón.

1.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el contenido del carbono orgánico total (COT) del suelo y el contenido de carbono orgánico proveniente de las fracciones granulométricas que son el carbono de la fracción particulada (COP) y carbono de la fracción asociada a los minerales (COAM) en base a los horizontes.
- Cuantificar el contenido de delta carbono 13 ($\delta^{13}C$) en base a los horizontes con sus respectivas profundidades y la determinación de abundancia natural de $\delta^{13}C$ en base a sus órdenes.
- Determinar la composición isotópica de $\delta^{13}C$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4, en base a sus horizontes y profundidad.
- Análisis y determinación de parámetros en los perfiles evaluados.
- Determinar el análisis de componentes principales (ACP) en base a los perfiles
- Determinar la correlación de Pearson entre los parámetros de estudio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ¿Qué es el suelo?

Según Contreras (2021) es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que se origina debido a la interacción de cinco factores de formación (clima, topografía, material parental, organismos y tiempo). Es un recurso natural limitado, tridimensional, dinámico y no renovable, los suelos ocupan un espacio reducido y puntual en la superficie terrestre (Escobedo, 2010).

El suelo cumple funciones naturaleza biológica, alimentaria, depuradora y de soporte mecánico, ya que en ella habitan numerosas y diversas especies microbianas, animales y vegetales responsables de la actividad metabólica (Azañero et al., 2020). Asimismo el suelo, realiza diversas funciones, como por ejemplo tenemos la participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos básicos para la vida como C, nitrógeno (N), fósforo (P), etc., por efecto de la energía disponible, pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta (Burbano, 2016). También realiza funciones ecológicas, como producción de biomasa, retención y filtración de agua, almacenamiento y reciclaje de nutrientes, forma parte del hábitat para que puedan realizar la actividad biológica y almacenamiento de C. Esta última se puede considerar como la función más importante de los suelos, porque no solo es decisiva para la regulación del clima, sino que también afecta fuertemente a todas las otras funciones que realiza el suelo (Wiesmeier et al., 2019).

2.1.1. Indicadores de la calidad del suelo

Larson y Pierce (1994) propusieron un conjunto de factores químicos, físicos y biológicos que, monitorizados en el tiempo, son capaces de detectar cambios en la calidad del suelo debido al manejo. La materia orgánica del suelo (MOS), expresado por la acción del carbono orgánico total (COT), se encuentra entre estas variables, siendo un componente importante del ciclo terrestre del C y estrechamente relacionado con el funcionamiento normal en la naturaleza de la MO como el atributo que mejor representa la calidad del suelo, debido a su sensibilidad a las prácticas de manejo (Bayer et al., 2000). Según Cerri et al. (1996) en ambientes en equilibrio, las ganancias son equivalente a pérdidas. Estos autores añaden que MOS se puede caracterizar por dos variables: las reservas de C y la calidad de los componentes orgánicos que contienen.

El uso frecuente de la MOS y/o contenido de COS como indicador de calidad del suelo se explica porque la MOS es altamente sensible a las prácticas de manejo realizadas, reflejando rápidamente los efectos de la fertilización, labranza, rotación de cultivos o incorporación de residuos orgánicos. Además, la mayoría de los atributos de las plantas, como

el crecimiento, la productividad y la resistencia al estrés, dependen en gran medida de la disponibilidad de nutrientes y de la capacidad del suelo para retener agua y mejorar su estructura, funciones en las que la MOS cumple un papel fundamental (Dalal y Mayer, 1986).

El suelo y el medio ambiente, relacionados con las funciones básicas del suelo, tienen una estrecha relación con la MOS, pues el contenido de C orgánico juega un papel crucial en mantener la calidad del suelo, la producción de cultivos y la calidad ambiental (Doran y Partín, 1994). Esto ocurre, debido a sus efectos sobre las propiedades físicas, procesos químicos y biológicos, como la retención de agua en el suelo, el reciclaje de nutrientes, flujo de gas y crecimiento de las raíces de las plantas (Al-Kaisi et al., 2005). La biomasa es una fuente de C y N, que puede reponer el C orgánico y el nitrógeno total del suelo. Los cambios en las condiciones del suelo pueden alterar la velocidad de descomposición de biomasa vegetal y tasa de mineralización de la MOS (Hiernaux et al., 1999).

2.2. Carbono del suelo

El suelo es el reservorio más grande de C de la biosfera terrestre, ya que posee aproximadamente el doble de C que la atmósfera y también presenta tres veces la cantidad de dicho elemento que hay en la vegetación (Dimas y Gnacadja, 2009). El C representa el 58 % de la MOS, por lo tanto, la determinación de los contenidos de C en el suelo se puede utilizar para estimar la cantidad de fracción orgánica en el suelo (Nanzer et al., 2019). Cuando se hace mención sobre la presencia de C en el suelo se entiende como el contenido de MOS que es lo mismo decir COS, teniendo en cuenta que el C tiene funciones nutricionales definidas y que el catabolismo microbiano se realiza en los compuestos orgánicos, toda vez que la MOS es la unificación de la MO muerta y la biomasa (Burbano, 2018). Ahora, la cantidad de dicho elemento en el suelo está en relación de sus características y al equilibrio de la tasa de entrada de C orgánico de naturaleza vegetal y animal, y la tasa de salida, que es resultado del proceso del metabolismo realizado por los microorganismos que genera CO₂ (Burbano, 2018).

La estrategia más eficiente que se tiene que realizar para impedir la pérdida global de C del suelo sería detener el proceso de conversión a tierras de cultivo, pero hay un factor que limita dicha estrategia que es el crecimiento poblacional, ya que para satisfacer las necesidades alimentarias se necesita gran extensión de terreno (Verhulst et al., 2015).

2.2.1. Carbono orgánico del suelo (COS)

Conforma la mayor reserva ya que se encuentra en constante interacción con la atmósfera y su valor oscila de 1 500 pg C a 1 m de profundidad y cerca de 2 456 pg C a 2 m de profundidad (1 pg = 10⁻¹² g) (Burbano, 2016). Es un componente fundamental del ciclo global del C, abarca el 69,8 % del C orgánico de la biosfera (Organización de las Naciones

Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2001). La calidad de los suelos minerales se reconoce por el COS ya que es un indicador y también sirve para detectar los cambios de C en el tiempo (González-Molina et al., 2008). El COS tiene relación con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, por ello afecta a las propiedades que tiene el suelo que están relacionados al rendimiento sostenido de los cultivos (Martínez et al., 2008).

Los cambios del COS tienen un grado de dificultad para cuantificar ya sea a pequeña y grande escala ya que puede ser en parcelas, regiones o incluso a nivel mundial, debido a factores variables en tiempo y en espacio (Post et al., 2001). El COS puede ser desestabilizado a distintas profundidades en el perfil del suelo por diversos factores ya sea climáticos o antropogénicos, por lo que fundamental caracterizarlo en forma adecuada. La modelación de la distribución vertical del COS ha sido analizada generalmente con el uso de enfoques empíricos de ajustes de modelos matemáticos. La finalidad de dicho esquema de modelación es caracterizar el COS a profundidad del perfil del suelo en diferentes usos del suelo (Barrales-Brito et al., 2022).

2.2.2. Almacenamiento de carbono del suelo

El propósito es la mitigación del cambio climático y también de reforzar la seguridad alimentaria, como consecuencia de un gran incremento del rendimiento agrícola. Se tiene en cuenta que lo antes mencionado es posible si se realizan “prácticas agrícolas adecuadas” las cuales son; rotación de cultivos, acumulación de agua reciclada mediante riego localizado, siembra sin labranza, cobertura del suelo, uso de carbón vegetal, gestión integrada de los nutrientes. De realizar dichas estrategias, entonces es posible fijar o almacenar en el suelo de 200 a 1000 kg de C/ha/año (Lal, 2009).

El C almacenado en el suelo depende de ciertos parámetros como el tipo de suelo, manejo, uso y profundidad. Por ello, dichos factores son determinantes para la presencia y realizar el proceso de descomposición de la MO, que es considerada como fuente primaria del almacenamiento de C (Lok et al., 2013).

Es importante resaltar que la fijación del C realizado por el suelo es definida de manera errónea como “secuestro de carbono” o “captura de carbono”. Lo que ocurre es que obstruye al CO₂ para que se dirija a la atmósfera, ya que es un gas del efecto invernadero que ocasiona el cambio climático. Entonces con la intervención de plantas y la acción de los microorganismos habitantes del suelo, ocurre un proceso de transformación del C hasta MO, que finalmente se acumula por largos periodos de tiempo. Dicho C almacenado en el planeta en los 100 cm de suelo, es superior al C almacenado en la vegetación (Burbano, 2016).

Cabe mencionar que la FAO (2001) define al secuestro de C como un proceso mediante el cual el mismo elemento se fija de la atmósfera a través de plantas o residuos orgánicos y se almacena en el suelo. Para que suceda dicho proceso se involucran tres etapas: 1) eliminación de CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis de la planta; 2) transferencia de C del CO₂ a la biomasa vegetal; y 3) transferencia de C de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva más lábil.

2.3. Técnicas de estudio de carbono en el suelo

2.3.1. Fraccionamiento Físico o Granulométrico

Permite el estudio de compartimentos más humificados ligados a la fracción mineral del suelo, arena, limo y arcilla, que son más estables a los cambios de suelo causados por cambios en el manejo (Sousa, 2017). Se fundamenta que la MOS está asociada con partículas de diferentes tamaños, que difieren en composición mineralógica, estructura y función (Christensen, 1992). La textura y estructura del suelo tiene relación con la dinámica de la MO, por ende, realizar una cuantificación de la MO enlazada a las fracciones granulométricas, ayuda con la comprensión sobre la reactividad química, la estructura y fertilidad del suelo (Videla y Trivelin, 2008). La fracción arena tiene atracciones débiles con la MOS, las partículas de arcillas y los limos presentan varios sitios reactivos donde son fuertemente adsorbidos la MOS (Lützow et al., 2007). Por lo tanto, cabe resaltar que las partículas del tamaño de la arena son más lábiles en comparación con aquellas del tamaño de arcillas y limo de la fracción de MOS (Hassink et al., 1997).

Las fracciones granulométricas de acuerdo con el tamaño de las partículas son consideradas heterogéneas en relación con su tiempo de recambio y no pueden ser equivalentes a las piscinas modelo. Distintos mecanismos de unión parecen ser los responsables de la diferenciación del depósito pasivo, entonces la sub fracción arcilla fina indica la edad más joven realizando la respectiva comparación con la subfracción de arcilla gruesa (Kahle et al., 2003; Kleber et al., 2004; Laird et al., 2001; Lützow et al., 2007; Wattel-Koekkoek et al., 2003).

2.3.1.1. Carbono orgánico particulado (COP)

Conocido también por otros autores como materia orgánica particulada, no asociada al mineral y de tamaño mayor a 53 μm , puede estar obstruido, protegido por agregados o libre en el suelo; y está más disponible para procesos de descomposición ya que constituye la materia orgánica lábil del suelo (Dalal y Mayer, 1986). El COP tiene origen reciente y está formada por restos vegetales en proceso de descomposición, esporas, hifas de hongos y por restos de fauna edáfica (Wander, 2004).

El COP está más relacionado con el manejo y los efectos son más notorios en los suelos de textura fina. Por este motivo, se proponen las relaciones entre el COT, COP y la arcilla como un indicador del efecto de las prácticas agrícolas sobre dichos suelos (Galantini y Suñer, 2008). Asimismo, cumple un papel importante no solo para la biológica del suelo, también para sus propiedades físicas. Por lo tanto, pueden intervenir en la agrupación de partículas para que de esa manera se puedan formar macro y micro agregados. En general dicho proceso determina la estabilidad de los agregados e interfiere sobre el grado de protección física de la MO en función del manejo del suelo (Six et al., 2004).

2.3.1.2. Carbono orgánico asociado a los minerales (COAM)

También conocida por otros autores como materia orgánica asociada a los minerales ya que se caracteriza por el tamaño de la partícula por ser menor a 53 μm y está compuesto por moléculas de bajo peso molecular siendo microscópicas y productos de descomposición microbiana (Cotrufo y Lavalley, 2022)

Es la fracción de COS que se encuentra en estado de descomposición avanzada y está asociada a las fracciones limo y arcilla del suelo, se define como una fracción que interactúa con la superficie de las partículas minerales (Chiquito et al. 2019). Al formar complejos órgano-minerales, el COAM está protegido contra la descomposición en los microporos de los agregados del suelo, lo que lo hace menos accesible a la acción de los microorganismos descomponedores y sus enzimas (Schiebelbein et al., 2023).

Las alteraciones en el COAM se encuentran asociadas con la entrada de C a través de las raíces y sus exudados (Cotrufo y Lavalley, 2022). Sin embargo, cabe resaltar que la acumulación de COAM puede estar asociada a cualquier fuente de C. Los residuos y exudados de las raíces son más propensos a la transformación y a la formación de COAM debido a la abundancia microbiana de la rizosfera que es de dos a 20 veces mayor que en el suelo a granel. (Cotrufo et al., 2013)

2.3.2. Carbono orgánico total del suelo (COT)

En el suelo se encuentra dos formas de C orgánica e inorgánica. El contenido total de C orgánico almacenada en los suelos ha sido calculado por diversos métodos y su valor es cercano a 1 500 pg con una profundidad de 1 m y las estimaciones de C inorgánico su valor es alrededor de 1 700 pg ($1 \text{ pg} = 10^{-12} \text{ g} = 10^{-15} \text{ kg}$), pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio (Martínez et al., 2008).

La dinámica del COT aporta información para poder estudiar los efectos en corto plazo de las prácticas agronómicas, ya que las fracciones orgánicas de mayor abundancia en la corteza terrestre son de ciclado más lento, por ello, para visualizar esas diferencias tiene

que pasar varios años. Por el contrario, las fracciones lábiles son más sensibles a los efectos del manejo del suelo, y pueden ser usados como indicadores tempranos de la fertilización, del efecto de la rotación de cultivos y del sistema de labranza sobre la calidad del suelo (Burbano, 2016).

2.3.3. Delta carbono 13

Los isótopos de C como es el caso del $\delta^{13}\text{C}$ estable proporciona metodologías para poder estudiar los residuos orgánicos fresco y como realizan el proceso de transformación en MOS y sus diferentes fracciones. En los tejidos de las plantas C3 se diferencia en la abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ y C se ha utilizado como un marcador de COS para estudios in situ (Layese et al., 2002). Según Gregorich et al. (1996), los métodos isotópicos, como la proporción natural de C13, es sumamente útil porque facilita la estimación del tiempo que la materia orgánica y la de sus fracciones en el suelo. La proporción de C13 natural es adecuada para evaluar tasas de recambio en escalas de tiempo desde años hasta siglos.

La técnica basada en la proporción de C13 solo se puede utilizar si se ha producido un cambio de vegetación entre tipos fotosintéticos (C3 y C4), o viceversa. Las plantas con metabolismo C4, en comparación con las plantas C3 que discriminan en menor cantidad el $\delta^{13}\text{C}$ que se encuentran en forma natural en el CO_2 atmosférico. Los estudios realizados se fundamentan en que el COS proviene de restos de plantas y, de esta forma, los cambios en la vegetación (C3 o C4) resultan en las correspondientes diferencias de $\delta^{13}\text{C}$ en la MOS. (Balesdent et al., 1987). En el sistema utilizado para este presente trabajo determinó simultáneamente las relaciones isotópicas $R(iE/jE)$ muestra, que se expresaron como una diferencia relativa en la relación isotópica δ^iE , en ‰, de acuerdo con la ecuación.

$$\delta^iE_{(\text{‰})} = \frac{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{\text{sample}}}{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{\text{standard}}} - 1$$

Donde iE es el isótopo raro, jE el isótopo abundante y $R(iE/jE)$ estándar son las relaciones estándar internacionales VPDB y Ar a R ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) VPDB. Los resultados se normalizaron a partir de los estándares de referencia certificados USGS 61, USGS 62, USGS 63, USGS 90 y USGS 91 (Paul et al., 2007; Schimmelmann et al., 2016, 2020). La incertidumbre estándar del análisis se estimó en $\pm 0,10$ ‰ para $\delta^{13}\text{C}$.

La FAO (1998) señala que la principal ventaja de los métodos isotópicos es que permiten medir el recambio de la materia orgánica, lo que a su vez permite deducir el

tiempo que diferentes compartimentos han estado presentes. Tras cambios significativos en la vegetación, como la transición de bosques a cultivos o pastizales, se puede rastrear la evolución de distintos tipos de residuos vegetales. Además, señala que los diversos reservorios de C en el suelo tienen diferentes tiempos promedio de residencia, que pueden ir desde uno o pocos años hasta varias décadas o más de mil años (fracción estable), dependiendo de su composición bioquímica. Por ejemplo, la lignina presenta mayor estabilidad que la celulosa. Existe también cierta relación con la composición, aunque es más relevante el tipo de protección o las uniones químicas involucradas.

2.4. Estado del arte

En el Perú son muchos los trabajos realizados con relación a la MOS y el almacenamiento de C en el suelo. No obstante, es escaso o nulo los trabajos relacionados específicamente a entender y/o relacionar la influencia del tipo de suelo sobre el almacenamiento de C en este (Gibbon et al., 2010).

Como menciona Wiesmeier et al. (2012) básicamente las investigaciones fueron enfocadas en función al uso del suelo o tipos de sistemas agrícolas cuya profundidad de muestreo para la determinación del C son restringidas principalmente a los primeros centímetros del suelo o capa arable (20 cm de profundidad), lo que podría conducir a una subestimación de la cantidad real de C almacenado en el suelo. No obstante, la determinación de C en el suelo en cada uno de los horizontes de este proporciona una información más precisa y detallada de los parámetros que controlan la capacidad de almacenamiento de C en el suelo, así como cierta influencia de los aspectos pedogenéticos del suelo.

Wiesmeier et al. (2012) quien menciona que la capacidad de C almacenado en el suelo se ve afectada, además del uso del suelo, por el tipo de suelo y profundidad de muestreo. Disminuye según el tipo de este: Histosols > Gleysols > Leptosols. Regosols > Podzols > Cambisols, esto debido a la presencia de horizonte B bien desarrollados, a la cantidad de arcilla en el suelo, residuos de la meteorización de calizas, al estancamiento de agua, migración de arcillas, etc. Resaltando de esta manera la importancia de las propiedades pedogenéticas según los tipos de suelos.

La estabilidad de la MOS es controlada por el contenido y naturaleza de las arcillas (Six et al., 2004; Wiesmeier et al., 2019), por el aluminio cambiante (Scheel et al., 2007), calcio cambiante (Rowley et al., 2018), temperatura y potencial redox (Dalmolin et al., 2006), por lo que es muy importante como determinar el contenido total de MOS es determinar el contenido asociado a sus fracciones: COP y COAM; principalmente limo y arcilla que generan mayor

capacidad al suelo de estabilizar el C orgánico. Tanto el COP y COAM son componentes importantes y dinámicos muy selectivos con rápida respuesta a los cambios de manejo del suelo y/o disturbios presentes en este.

Dou et al. (2016) evaluando la dinámica del CO en el suelo por efecto de la fertilización registraron que el COP fue capaz de almacenar, en promedio, el 76,87 % de COS de 40,06 g/kg de COT y que, con el uso de fertilizantes nitrogenados y balanceado de NPK la MO en la fracción mineral se torna importante en el almacenamiento de C.

Las plantaciones de caucho o jebe en sistemas agroforestales (SAF) con cacao, brindan servicios ambientales como control de la temperatura, humedad relativa, luminosidad y horas de sol, microclimas favorables, control de malezas y secuestro, captura y almacenamiento del CO₂ en el suelo. Con los SAF de jebe con cacao es posible disminuir la generación de gases de efecto invernadero por la captura y almacenamiento del carbono por parte del sistema agroforestal (Zavala et al., 2019)

La relación de isótopos estables en compuestos orgánicos e inorgánicos, frecuentemente muestran informaciones relacionadas a los procesos de formación de estos compuestos, así como a la tasa en la cual estos procesos ocurrieron bajo ciertas condiciones ambientales en la cual fueron formados (Tonucci, 2010). En las últimas décadas, la técnica fraccionamiento isotópico de $\delta^{13}\text{C}$, ha sido abordada para comprender el proceso de sucesión vegetal (Yang et al., 2022), los efectos de deficiencia hídrica, dinámica de la materia orgánica, fuente y origen en el tiempo (Dai et al., 2022); además de la historia del clima local. Es por ello por lo que el $\delta^{13}\text{C}$ es utilizado como un índice de respuesta del ecosistema al clima y como una variable sustituta en el modelo de flujos de carbono en ecosistemas terrestres (Ito, 2003).

El $\delta^{13}\text{C}$ de estos diferentes tipos fotosintéticos de plantas C₃ y C₄ es el resultado de: (I) propiedades bioquímicas de la fijación primaria de CO₂ por enzimas, (II) limitaciones de la difusión de CO₂ dentro de las hojas y (III) relación entre la presión interna de CO₂ en la cámara estomática y la presión externa de la atmósfera. Estas diferencias isotópicas naturales permiten que el carbono derivado de cada ciclo fotosintético se ubique en el reservorio de materia orgánica del suelo, siendo cada vez más utilizado para estudios paleoambientales, ya que permite documentar cambios de vegetación en suelos de distintas edades (Farquhar et al., 1989).

Este trabajo hace una exhaustiva revisión de los factores que controlan los gradientes de $\delta^{13}\text{C}$ del carbono orgánico en los perfiles de suelo. Destaca que los mayores cambios superiores a 10 ‰ se observan en sitios donde ha habido una transición entre vegetación C₃ y C₄, alterando radicalmente las firmas isotópicas de entrada de carbono.

Cuando no hay cambios drásticos en la vegetación, los contenidos de $\delta^{13}\text{C}$ típicamente se enriquecen en 1 a 3 ‰ al descender del horizonte superficial al subsuelo. Esta tendencia se atribuye principalmente a tres procesos: (1) el efecto Suess, es decir, el descenso en la $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 atmosférico desde 1850 (~ 2.0 ‰), (2) la elevación de la concentración de CO_2 atmosférico que también depleciona la biomasa (~ 1.8 ‰) y (3) el fraccionamiento isotópico durante el reciclaje microbiano continuo y la acumulación de necro masa. Estos procesos interactúan con mecanismos internos del suelo como la fracción preferencial, la estabilidad físico-química y el transporte vertical lo que torna compleja la interpretación de los patrones observados (Werth et al., 2023).

Saiz et al. (2015) investigaron la influencia de la vegetación C_3 y C_4 en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) en ecosistemas tropicales a lo largo de un gradiente de precipitación en África Occidental, utilizando variaciones en $\delta^{13}\text{C}$ y relaciones C/N tanto en muestras totales como en fracciones asociadas a partículas gruesas y finas. Sus resultados evidenciaron que la textura del suelo, particularmente el contenido de arena, explica gran parte de la variabilidad observada, logrando predecir hasta un 63 % cuando se combina con valores de $\delta^{13}\text{C}$. Asimismo, identificaron que mayores precipitaciones favorecen la acumulación de carbono derivado de vegetación C_3 en horizontes profundos, mientras que las fracciones arenosas presentan carbono con tiempos de residencia cortos incluso en capas profundas, y la materia orgánica asociada a limo y arcilla muestra mayor persistencia en sabanas que en bosques adyacentes.

Werth et al. (2023) realizaron una revisión sobre los factores que controlan los gradientes de $\delta^{13}\text{C}$ del carbono orgánico en los perfiles del suelo, destacando que los cambios más marcados fueron superiores a -10 ‰ y que estos se registran en sitios con transiciones históricas entre vegetación C_3 y C_4 , las cuales modifican de manera significativa las firmas isotópicas del carbono incorporado al suelo. En ausencia de cambios drásticos en la cobertura vegetal, el $\delta^{13}\text{C}$ del carbono orgánico del suelo suele mostrar un enriquecimiento moderado, de 1 a 3 ‰, desde el horizonte superficial hacia el subsuelo. Esta tendencia se asocia principalmente a tres procesos atmosféricos, la interacción de estos factores con procesos internos del suelo, como el fraccionamiento preferencial, la estabilidad físico-química y el transporte vertical, dificultan la interpretación de los patrones de $\delta^{13}\text{C}$ en profundidad.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El área de estudio se localiza en el Valle de Monzón de la provincia de Huamalés, departamento Huánuco, teniendo como altitud un promedio de 920 m.s.n.m. mayor detalle de la zona en estudio y las calicatas (perfiles) realizadas a través de la topo secuencia se visualizan en la Figura 1. Los datos de las coordenadas en UTM, centro poblado, clima temperatura y precipitación de los perfiles evaluados se presentan en la Tabla 1, donde “M” se refiere a la calicata y junto a ella su numeración respectiva. Las muestras de suelos de cada horizonte identificado fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

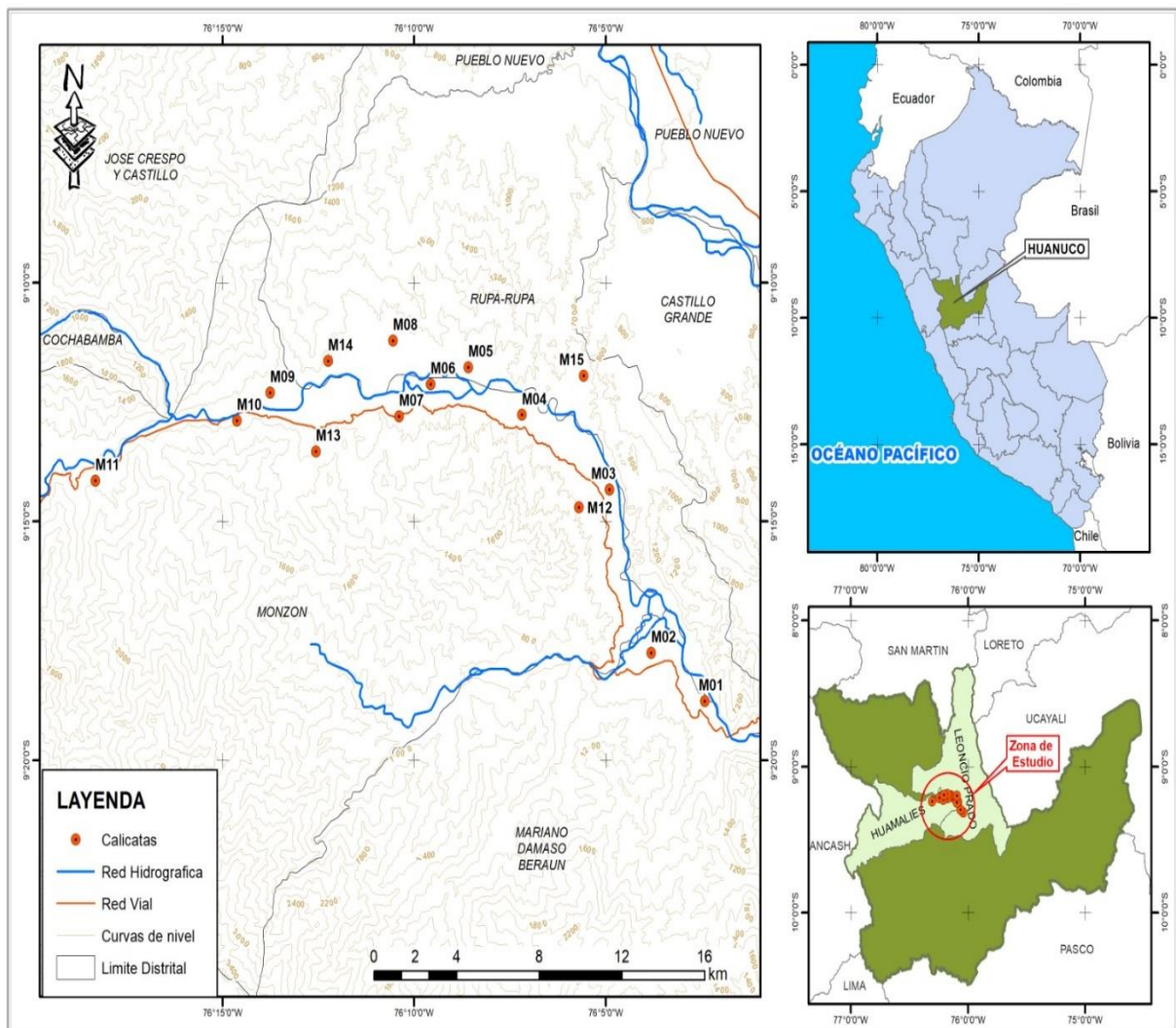


Figura 1. Mapa de ubicación de los 15 puntos de muestreo

Tabla 1. Datos de clima, temperatura, precipitación, centro poblado y coordenadas UTM según los perfiles de estudio

Perfil	Clima	Temperatura	Precipitación	Centros poblados	Coordenadas E/N
M01, M02, M03, M04, M05, M06.	Lluvioso, muy húmedo, cálido.	Min:	2 100 a 500 mm.	Sachavaca, Soledad, Palo Wimba, Palo de acero, Agua blanca, Rondos, Inti y Bella.	(0385198) (8970299); (0383625) (8971983); (0381621) (8974801); (0379822) (8977543); (0381359) (8979672); (0380130) (8979024)
		17-21 °C			
M07, M08, M09, M10, M11, M13, M14, M12, M15.	Lluvioso, templado y húmedo.	Max:	1 200 a 3 000 mm.	Tazo Grande, Cachicoto, Rio Espino, Camote, Frente, Rivera, Paujil y Manchuria.	(0380662) (8980679); (0372111) (8982543); (0370746) (8984311); (0367684) (8998346); (0365705) (8982689); (0371057) (8981387); (0367151) (8979995); (0363436) (8981326); (0356545) (8978842)
		31-33 °C			
		Min:			
		11-17 °C			
		Max:			
		25-29 °C			

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Los materiales que se usaron fueron 1 tabla Munsell, 81 crisoles de porcelana, 1 piedra ágata, 1 tamiz de 53 μm , 2 disecadores, 81 balones volumétricos de 25 ml, 81 balones volumétricos de 200 ml, 81 tubos de centrifuga de 60 ml, 162 microtubos Eppendorf de 1,5 ml, 4 gradillas de plástico, 2 pinzas de acero, 1 bloque de metal pequeño tipo gradilla, 162 capsulas de estaño de 48 μL , 2 estantes pequeños para muestras. Respecto a los reactivos se usaron agua destilada, hexametáfosfato de sodio (NaPO_3)₆, dicromato de sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), hidróxido de sodio (NaOH), alcohol al 70 %, patrón isotópico de urea (C-13, N-15) 5 g y ciclohexanona.

Los equipos utilizados fueron 1 GPS, 1 cámara fotográfica, 1 estufa, 1 agitador horizontal pendular (150 rpm), 2 balanza electrónica, 1 centrifuga (3000 rpm), 1 micro balanza Mettler Toledo XP6 y 1 Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS.

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Variables de estudio

- **Variables dependientes:** capacidad de almacenamiento de carbono del suelo, contenidos de carbono orgánico de la fracción particulada (COP) y la fracción asociada a los minerales (COAM), carbono orgánico total (COT) y el $\delta^{13}\text{C}$.
- **Variables independientes:** los tipos de suelo de la topo secuencia del Valle del Monzón.

3.2.2.2. Diseño de la investigación

Corresponde a un diseño no experimental, mediante un tipo de investigación descriptivo, cuya área de estudio fue en una topo secuencia que abarcó el valle del Monzón.

3.2.2.3. Muestreo de suelo y apertura de calicatas

Para estas actividades se trabajó en fases, en la cual como primera fase fue la ubicación de los puntos a través del Google Earth, una vez llegado al punto de muestreo se cavó un agujero en las zonas de estudio (Figura 1), donde los parámetros establecidos fueron de 1 m de ancho x 1,5 m de largo x 1,5 m de profundidad, esta última varió según las condiciones de la calicata, ya que en algunas se llegó a la napa freática. Así mismo se realizó la medición de la profundidad, se delimitaron los horizontes y se clasificaron de acuerdo con Soil Taxonomy (2022), la determinación de los colores de los suelos evaluados fue

verificados de acuerdo con la tabla de Munsell (Munsell Color, 2012), cada uno de los datos obtenidos fueron colocados en una ficha de descripción (Figura 8).

Se obtuvieron 15 calicatas contabilizándose en total 81 horizontes de los cuales de cada uno de los horizontes se sustrajeron muestras de suelo, cabe resaltar que se presentó la codificación donde “M” se refiere a la calicata y junto a ella su numeración respectiva. Una vez que se extrajeron las muestras, estas fueron transportadas al Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en donde se llevó a cabo el proceso de secado en unas bandejas, el proceso de secado fue bajo sombra para obtener tierra fina seca al aire (TFSA). Cabe destacar que también se hizo el descarte de hojas, raicillas, piedras u otro material que no sea suelo. Una vez secas las muestras se procedieron a pasar por un tamiz N° 2 mm, se codificaron y se separaron para los análisis correspondientes.

3.2.2.4. Cuantificación del contenido de carbono orgánico total (COT) del suelo y el contenido de carbono orgánico proveniente de las fracciones granulométricas que son el carbono de la fracción particulada (COP) y carbono de la fracción asociada a los minerales (COAM) en base a los horizontes

Para efectuar la cuantificación del contenido de carbono se realizó una actividad previa, que es la técnica del fraccionamiento físico o granulométrico de la MO en la cual se realizan determinaciones de las fracciones de la materia orgánica particulada (MOP) y de la materia orgánica asociada a los minerales (MOAM), esto siguiendo el método descrito por Cambardella y Elliott (1992).

La fracción de MOP se obtuvo a partir de una muestra de TFSA, se pesó 20 g y luego se colocó en el matraz con capacidad de 125 mL. Se adicionó 60 mL de $(\text{NaPO}_3)_6$ y se procedió a la agitación de la suspensión por 15 h en agitador horizontal pendular (150 rpm). En seguida, el contenido de los matraces fue tamizado, con auxilio de chorros de agua, en tamiz con malla de 0.053 mm, límite de diámetro superior de la partícula de limo, por la escala americana. La fracción particulada, de la muestra retenida en el tamiz se secó en estufa a 50 °C. Entonces, se determinó la masa de la muestra y se molió en una piedra ágata para el análisis del contenido de carbono en dicha fracción particulada (Yeomans y Bremner, 1988); a partir de este procedimiento, se obtuvo el contenido de C (%) en la fracción particulada. La fracción de la MOAM proviene del material no retenida en el tamiz, consistente en el material de tamaño que corresponde a limo y arcilla, se consideró como aquella que está asociada a los minerales del suelo y, por lo tanto, no lábil.

3.2.2.4.1. Determinación del COP y COAM

El contenido de C de las muestras de suelo que corresponde a cada horizonte de los perfiles seleccionados fue determinado en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

La determinación fue conforme al “método Dakota do sul” modificado, y descrito en Raij et al. (1997). Este método consistió en la oxidación de la MO por el $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$, cuantificándola mediante un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) a 650 nm. Consistió en pesar 1 g de muestra (MOP), por lo cual se colocó dentro de un matraz de 150 mL, donde se adicionó 10 mL de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a concentración de 0,0667 mol L⁻¹ + H_2SO_4 5 mol L⁻¹. Se agitó durante 10 minutos, a 180 rpm, en una máquina de agitación con movimiento circular horizontal. Después de un reposo de 60 minutos, se adicionó 50 mL de agua destilada, promoviendo la combinación de las soluciones; se dejó decantar durante toda una noche. Al día siguiente, se efectúa la lectura por medio de un EAA.

El contenido del MOP fue calculado realizando la metodología descrita por Raij et al. (1997), calculándose de esta manera la fracción denominada carbono orgánico particulado (COP), para lo cual, así mismo cada muestra del suelo entero perteneciente también fue calculado el carbono orgánico total (COT), mayores detalles de su determinación se especifica en el 3.2.2.4.2. La determinación del carbono orgánico asociado a los minerales (COAM) se hace en base a una sustracción que a continuación se menciona.

$$\text{COAM} = \text{COT} - \text{COP}$$

Donde el carbono orgánico asociado a los minerales (COAM) es igual a la diferencia entre el carbono orgánico total (COT) y el carbono orgánico particulado (COP).

3.2.2.4.2. Cuantificación del contenido de carbono orgánico total (COT) del suelo

La determinación es realizada en base a la metodología descrita por Raij et al. (1997). Este método fue realizado en la muestra original de TFSA obtenida en laboratorio (1 g de suelo de cada muestra), para lo cual se utilizó 10 mL de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a concentración de 0,0667 mol L⁻¹ + H_2SO_4 5 mol L⁻¹. Se agitó durante 10 min, a 180 rpm, en una máquina de agitación con movimiento circular, después de un reposo de 60 min, se adicionó 50 ml de agua destilada, promoviendo la combinación de las soluciones; se deja decantar durante una noche. Al día siguiente, se efectúa la lectura, cuantificándola mediante un EAA a 650 nm. En base a ello, se obtuvo el término de carbono orgánico de la muestra, este carbono tiene la denominación de COT ya que proviene de la muestra original proveniente del campo y preparada para su análisis en laboratorio.

3.2.2.5. Cuantificación del contenido delta carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) en base a los horizontes con sus respectivas profundidades y la abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en base a sus órdenes

3.2.2.5.1. Cuantificación de delta carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$)

Se realizó en el laboratorio de centro de isótopos estables prof. Dr. Carlos Ducatti. CIE del Instituto de Biociencias “IBB” de la Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP ubicado en el Campus de Botucatu/ Sao Paulo/ Brasil. Para ello se contó con el apoyo y experticia del jefe del CIE el Dr. Vladimir Eliodoro. Por lo cual en Perú se trabajó las muestras que iban a ser realizadas en dicho centro, estas muestras fueron molidas, pasadas por tamiz de 2 mm y transferidas a microtubos de 1,5 ml. A continuación, se mencionan las actividades realizadas ya en el CIE:

a. Pesado de muestras de suelo

Las muestras de suelo que en total fueron 81, necesitaron ser pesadas, puesto que el equipo que se utilizó es sumamente sensible, por lo cual se utilizó la micro balanza Mettler Toledo XP6 porque se necesitó obtener microgramos de cada muestra, realizándose lo siguiente:

Se realizó un proceso de prueba de las muestras, donde se determinó el C y la masa a usar. Entonces el especialista del CIE sugirió elegir tres muestras al azar según sus profundidades, considerando la teoría, que mientras más superficial el suelo, más C debería tener. Las muestras seleccionadas fueron M4 Ap, M5 Bw2, M12 BC, con profundidades de 0 a 5 cm, 20 a 40 cm, 70 a 100 cm, respectivamente, todas pesadas entre 500 a 600 μg , peso para suelos fértiles según el laboratorio, fueron analizadas en el equipo Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS que consiste en colocar la muestra dentro del equipo y de manera automática arroja resultados de curvas de C de los suelos comparados con una curva de carbono estándar. Las comparaciones entre curvas dieron como resultado que el suelo M12 BC tiene una curva muy poco visible, que significa que necesitan más masa para que el equipo pueda encontrar C. Entonces de las 81 muestras, las que tiene profundidades menores a 40 cm serán pesadas entre 500 a 600 μg y mayor a esa profundidad entre 1500 a 2000 μg .

Ya determinada las masas de las muestras relacionadas a su profundidad, se realizó el pesado de cada una, de 500 a 600 μg para muestras < 40 cm de profundidad y 1500 a 2000 μg para muestras > 40 cm de profundidad en capsulas de estaño para cada una, teniendo el debido cuidado y limpieza que el laboratorio y equipo necesite.

b. Pesado de químicos estándar para calibración

El equipamiento del laboratorio Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS necesita ser calibrado con muestras químicas que dan resultados conocidos. Por ende, previo al análisis de suelo que consiste en colocar las muestras en el equipo, se realizó la calibración con los químicos que dan resultados conocidos: patrón de trabajo isotópico de urea (C-13, N-15) 5 g y ciclohexanona, que son especiales para calibrar este tipo de máquinas. El procedimiento de pesado fue de 200 a 250 µg para patrón de trabajo isotópico de urea (C-13, N-15) 5 g y de 50 a 80 µg para ciclohexanona. Teniendo 24 muestras para cada químico, dando un total de 48 muestras para su calibración.

c. Análisis en el equipo Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS

Este procedimiento es sumamente sencillo, una vez realizado la calibración antes mencionada, se procedió a colocar las muestras de suelo, cada una analizada individualmente con un software que maneja el laboratorio, donde se almacenan los resultados con el código correspondiente y se comparan las curvas de carbono con el estándar de calibración, para dar con el total de carbono de cada muestra. Se usó el equipo Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS. El sistema determinó simultáneamente las relaciones isotópicas $R(iE/jE)$ muestra, que se expresaron como una diferencia relativa en la relación isotópica δiE , en ‰, de acuerdo con la ecuación.

$$\delta^i E_{(‰)} = \frac{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{sample}}{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{standard}} - 1$$

Donde iE es el isótopo raro, jE el isótopo abundante y $R(iE/jE)$ estándar son las relaciones estándar internacionales VPDB y Ar a R ($^{13}C/^{12}C$) VPDB. Los resultados se normalizaron a partir de los estándares de referencia certificados USGS 61, USGS 62, USGS 63, USGS 90 y USGS 91 (Paul et al., 2007; Schimmelmann et al., 2016, 2020). La incertidumbre estándar del análisis se estimó en $\pm 0,10$ ‰ para $\delta^{13}C$.

3.2.2.5.2. Determinación de la abundancia natural de $\delta^{13}C$

La abundancia natural de $\delta^{13}C$ fue evaluada por medio de un espectrómetro de masa isotópica de flujo continuo (espectrómetro de masa Finnigan Delta Plus acoplado a un auto analizador de C total Carlo Erba EA 1108 –

internacional PDB), donde aproximadamente se tomó 300 mg de cada muestra de TFSA, se molieron, y finalmente se pasaron por un tamiz de 100 mesh, con una precisión de cuatro decimales. El análisis de abundancia isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ fue realizada en el laboratorio de centro de isótopos estables prof. Dr. Carlos Ducatti. CIE del Instituto de Biociencias “IBB” de la Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP ubicado en el Campus de Botucatu/ Sao Paulo/ Brasil.

Los resultados se expresaron utilizando la unidad relativa " δ ", determinada en relación con el estándar internacional "PDB" (caliza de la formación Pee Dee), según la siguiente expresión: $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = 103 \times (\text{R muestra} - \text{R estándar}) / \text{R estándar}$, donde R muestra es la relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra y R estándar es la relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del estándar.

3.2.2.6. Determinación de la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4, en base a sus horizontes y profundidad

Esta composición isotópica fue determinada en base a la estadística en las cuales se generó Los diagramas de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ frente a profundidad con tres secciones separadas de plantas C3, C4 y C3/C4 se generaron usando la función ggplot y el parámetro facet_wrap del paquete ggplot2 v.3.5.2.

3.2.2.7. Análisis y determinación de parámetros en los perfiles evaluados

Los parámetros determinados fueron contemplados específicamente en base a los requerimientos que se precisaban para vincularlos con la topo secuencia del Valle del Monzón, que fueron los siguientes, altitud, orden, color, profundidad, stock de carbono, pH, Al y CIC. Que son descritos a continuación:

a) Altitud

La determinación de este parámetro consistió labores de gabinete y campo, en primera instancia a nivel de gabinete mediante el Google Earth y se ubicó los puntos de interés mediante las coordenadas (Tabla 1), una vez localizado los puntos, con el cursor sobre el punto se observó la altitud indicada en la esquina inferior derecha de la pantalla, asegurando de que la capa de elevación esté activada para obtener un valor correcto.

En segunda instancia mediante el trabajo de campo en cada uno de los puntos se utilizó el dispositivo GPS, en base a este se registró la altitud mostrada. Ya como tercera instancia a nivel de gabinete se compararon ambas mediciones, donde las pequeñas diferencias son normales.

b) Orden

Se realizó según la Soil Taxonomy, primero se inició con la recolección de una muestra representativa de todo el perfil desde la superficie hasta la roca madre o profundidad máxima accesible. Se describió cuidadosamente las características morfológicas de cada horizonte, cabe resaltar que se utilizó el anexo de la Figura 7 (ficha de apoyo para la descripción y clasificación taxonómica), posteriormente, se realizaron análisis en laboratorio, con el fin de confirmar la presencia de horizontes y propiedades diagnósticas definidas por la Soil Taxonomy. Con estos datos, se consultan las claves oficiales de clasificación publicadas, luego siguiendo el diagrama de decisión desde el nivel de orden hasta, si es necesario. Finalmente, se registra el nombre del orden y las evidencias que lo sustentan, garantizando que la identificación se base en criterios medibles y observables.

c) Color

Su determinación fue realizada al momento de la apertura de la calicata, utilizándose la carta Munsell, se tomó una muestra de cada horizonte encontrado en dicho perfil, preferiblemente con el suelo húmedo y también seco para registrar ambas condiciones. La muestra se desmenuzó para eliminar terrones grandes y se colocó sobre una superficie neutra. Se ubicó en un lugar con luz natural indirecta, evitando la luz solar directa que altere la percepción del color. Luego, se comparó la muestra con los colores de la carta, acercando la tierra a las ventanas de color hasta encontrar la coincidencia más cercana en matiz (hue), valor (value) y croma (chroma), leyendo el código completo indicado en la tarjeta (por ejemplo, 10YR 4/3). Finalmente, se registra el color obtenido y el horizonte del que proviene en el anexo – Figura 7.

d) Profundidad

Se seleccionó y marcó el sitio de acuerdo con el objetivo del estudio, evitando zonas de riesgo o que no sean apropiadas para una calicata. Se delimitó el área de excavación y se retiró la vegetación superficial. La excavación se realizó manualmente con una pala y un pico. Durante el avance, se registraron las características del suelo en cada horizonte, en algunos casos se continuó excavando hasta que se encontró la napa freática, en ese caso se detuvo la excavación, se registró la profundidad alcanzada y se documentó fotográficamente la condición del perfil, luego se tomó muestras según el protocolo de estudio. Los datos obtenidos fueron registrados en el anexo - Figura 8.

e) Stock de carbono

Su determinación fue realizada en base a una muestra representativa de cada horizonte. Así mismo se utilizó los datos determinados en base a la densidad aparente (D_a) mediante el método del cilindro, ya en laboratorio se hizo la determinación del COT (ítem 3.2.2.4.2.) y la profundidad a la que se tomó la muestra (e). Con estos datos, se calculó el stock aplicando la fórmula:

$$\text{Stock de C (Mg/ha)} = (\text{COT} \times D_a \times e) / 10$$

f) pH

Se pesó 20 g de suelo, y con un dispensador añadimos 20 ml de agua destilada (relación 1:1). Se llevó el rack B-11 al agitador de muestras y se agitó las muestras por 10 minutos, y luego pusimos 5 minutos en reposo. Finalmente, tomamos la lectura de pH en el pH-metro.

g) Al

Previo a la determinación de Al se realizó la preparación de diversas soluciones, se realizó la preparación de acetato de amonio y óxido de lantano. Posteriormente se procedió a la determinación:

De Ca, Mg, Na y K por medio de una fase de extracción: se pesó 5 g de suelo y se colocó en recipientes de agitación, añadimos 50 ml de KCL 1 N, adicionamos 20 ml de KCl y agitamos por 15 minutos, luego se filtró adicionando 30 ml más de KCl.

Se pasó a la determinación de Ca + Mg por el siguiente método: realizamos diluciones de 1/100 con el extracto (filtrado) y óxido de lantano, se tomó con una micro pipeta 100 micro litros del extracto y se echaron a un tubo de ensayo, se adicionaron 900 micro litros de óxido de lantano, luego con una pipeta tomamos 9 ml más de óxido de lantano y agregar al tubo de ensayo (volumen final 10 ml). Finalmente se realizó la lectura en el espectrofotómetro de absorción o emisión atómica.

Finalmente pasamos a la determinación de Al + H según el siguiente procedimiento: de lo obtenido del extracto del suelo, tomamos 10 ml, luego se agregó 3 gotas de fenolftaleína y titulamos con hidróxido de sodio 0,01 N hasta observar un color rosado pálido y anotamos el gasto.

Y para el Al se utilizó el mismo extracto que se utilizó para determinar la acidez cambiante, luego se agregó de 2 a 3 gotas de HCl 0,01 N para decolorar el filtrado anterior, después agregamos 10 ml de fluoruro de sodio al 4 % y finalmente volvemos a titular con HCl 0,01 N hasta que se vuelva incoloro y anotamos el gasto.

h) CIC

Se Pesó 5 g de muestra y lo pasamos al cartucho de papel filtro colocado en un embudo, luego se añadió una pequeña porción de agua con la piseta cubriendo la muestra hasta el ras del cono del papel filtro (esto eliminó iones solubles), se dejó filtrar el agua y se descartó. Después se añadió 100 ml de solución de acetato de amonio en varias etapas y se recibió la solución filtrada en una fiola de 100 ml, en la muestra quedó retenida parte de la solución, pero la fiola se enrasó con solución de acetato de amonio. Esta solución de la fiola se utilizó para las determinaciones de Ca, Mg, Na y K según los, luego se lavó la muestra con alcohol etílico para remover el exceso de acetato de amonio, el lavado terminó cuando la prueba con el reactivo se hizo amarillo pálido y la solución lavada se descartó. Luego se añadió 50 ml de solución de cloruro de sodio en 5 etapas de 10 ml cada una y se filtró en un Erlenmeyer, a este se añadió 10 ml de formaldehído, se agitó, se agregó de 2 a 4 gotas de indicador de fenolftaleína y se tituló con hidróxido de sodio hasta ver un leve rojo grosella.

3.2.2.8. Determinación del análisis de componentes principales (ACP) en base a los perfiles

Los análisis de componentes principales (PCA) se graficaron a través de un biplot de dos componentes usando el paquete factoextra v1.0.7. Previamente, y usando dplyr v1.1.4, se importó el data frame y se filtraron solo las variables numéricas (sin valores perdidos). Luego, cada variable se estandarizó a media cero y desviación estándar uno mediante purrr 1.0.4 y la función scale.

3.2.2.9. Determinar la correlación de Pearson entre los parámetros de estudio

La correlación de Pearson fue hecha a partir de los paquetes ggplot2 v.3.5.2 y ggpmisc v.0.6.1, personalizándose para mostrar estos valores. Todos estos paquetes se corrieron en el lenguaje de programación R v4.3.1 en el entorno R Studio v2023.06.1.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cuantificación del contenido de carbono orgánico total (COT) del suelo y el contenido de carbono orgánico proveniente de las fracciones granulométricas que son el carbono de la fracción particulada (COP) y carbono de la fracción asociada a los minerales (COAM) en base a los horizontes

En la Tabla 3 se verificó los resultados obtenidos del COP, dónde el valor más alto se ubica en el perfil M15 en el horizonte A, con una profundidad superficial de 0 a 25 cm, con 67,90 g/kg de carbono, y el valor más bajo en el perfil M14 en el horizonte C5, que está de > 110 cm, con un valor de 0,02 g/kg (Tabla 4). El valor máximo indica una alta acumulación de restos orgánicos poco descompuestos, como hojarasca, raíces finas activas, fragmentos vegetales que aún conservan su estructura. El COP se asocia principalmente a la fracción gruesa del suelo (por ejemplo, >53 μm) y está fuertemente influenciado por los aportes recientes de biomasa, la cobertura vegetal y la mínima perturbación del horizonte superficial. Su presencia elevada sugiere un manejo o uso del suelo favorable a la incorporación y preservación de materia orgánica fresca, como podría ocurrir en pastizales densos, sistemas forestales o suelos bajo labranza reducida (Panagea et al., 2022). En contraste, el valor mínimo refleja la casi total ausencia de COP en profundidad. Esto es coherente con la naturaleza del COP, que raramente se acumula en horizontes profundos por la escasa llegada de material vegetal, menor actividad radicular, condiciones más estables de humedad y temperatura, y una mayor descomposición antes de que cualquier resto pueda migrar hacia capas inferiores (Dubeux et al., 2024).

Para el carbono del COAM, se obtuvo el valor más alto en la calicata M7, horizonte A con 72,50 g/kg a una profundidad superficial de 0 a 12 cm (Tabla 2), y el más bajo en el M12, horizonte BC con 1,34 g/kg a una profundidad de 100 a 120 cm (Tabla 3). La profundidad del suelo es un factor importante que afecta la distribución y cantidad del COP y COAM, con el COP concentrada en capas superficiales y la COAM extendiéndose a mayores profundidades, aunque también presente en capas superficiales (Videla y Trivelin, 2008).

En el COT se observó el valor más alto en el horizonte A de la calicata M15, con 93,71 g/kg a una profundidad de 0 a 25 cm, y el más bajo en el M12, horizonte BC, encontrado 1,47 g/kg a una profundidad de 100 a 120 cm (Tabla 3). De acuerdo con Paz y Etchvers (2016) la distribución del COT en el suelo varía con la profundidad, con la mayor concentración en la capa superficial y niveles decrecientes a medida que se profundiza. Este patrón está influenciado por factores como la actividad biológica, el aporte de materia orgánica, el uso del

suelo y el clima. El estudio del COT es crucial para comprender el ciclo del carbono, la salud del suelo y la mitigación del cambio climático.

Los Inceptisols presentaron mayores contenidos de COT que los Entisols debido a su mayor desarrollo pedogenético y a la mayor estabilidad geomorfológica de las posiciones donde se ubican. Estos suelos poseen horizontes Bw incipientes, mejor estructura y mayor proporción de limo y arcilla, lo que favorece la estabilización del carbono en la fracción COAM, la cual mostró la correlación más alta con el COT. Esta capacidad de estabilización también se evidencia en el estudio de Sardón et al. (2021), quienes compararon el carbono orgánico en ácidos húmicos y fúlvicos entre cinco órdenes de suelo (entre ellos Inceptisols y Entisols) y encontraron que la fracción de ácido húmico en los Inceptisols es significativamente mayor que en los Entisols, indicando un mayor grado de humificación y, por tanto, una mayor acumulación estable de carbono. Por el contrario, los Entisols, localizados en zonas de erosión y cercanas a riberas, presentan escasa formación de horizontes, menor retención mineral y pérdida continua de materia orgánica, lo que limita la acumulación de carbono. Además, los Inceptisols poseen horizontes superficiales más profundos y con mayor aporte histórico de residuos vegetales, lo que refuerza su mayor capacidad de almacenar carbono respecto a los Entisols.

En el perfil M08 se observa un comportamiento atípico donde el COT profundo (30–55 cm) supera ampliamente al superficial. Este patrón se explica por la presencia de un horizonte C enterrado con alta acumulación de materia orgánica antigua, posiblemente producto de depósitos aluviales o coluviales característicos del Valle del Monzón. Esta materia orgánica, al quedar cubierta por sedimentos más recientes y por un horizonte superficial empobrecido por el uso agrícola (maíz), ha permanecido protegida de la oxidación y la actividad microbiana, conservando valores elevados de COT. Además, la señal isotópica del horizonte sobre yacente sugiere que parte de este carbono profundo proviene de vegetación C3 antigua, reforzando la hipótesis de un depósito paleo génico estabilizado en profundidad.

Tabla 2. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (COAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad del orden Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06 y M07)

Inceptisols					
Perfil	Horizontes	Profundidad	COP (g/kg)	COAM (g/kg)	COT (g/kg)
M02	Ap	0 - 20 cm	21,13	55,6	76,73
	A2	20 - 33 cm	11,83	54,43	66,26
	AB	33 - 50 cm	4,7	45,15	49,85
	Bw	50 - 90 cm	0,34	17,54	17,88
	BC	90 - 140 cm	0,13	14,22	14,34
	C	140 - 175 cm	0,06	8,63	8,69
M04	Ap	0 - 5 cm	24,29	63,47	87,76
	Bw1	5 - 20 cm	6,58	49,07	55,65
	Bw2	20 - 40 cm	4,67	27,07	31,74
	Bw3	40 - 60 cm	2,26	22,13	24,39
	Bw4	60 - 110 cm	0,77	7,49	8,26
	Bw5	110 - 125 cm	0,56	7,28	7,84
	BC	125 a +	0,35	6,92	7,27
M05	A	0 - 5 cm	17,5	54,56	72,06
	Bw1	5 - 20 cm	6,61	31,78	38,39
	Bw2	20 - 40 cm	5,75	31,37	37,12
	BC	40 - 60 cm	1,26	15,77	17,03
	C	60 - 110 cm	0,8	7,18	7,98
M06	A	0 - 20 cm	11,57	59,64	71,21
	Bw1	20 - 30 cm	2,94	21,87	24,81
	2C1	30 - 45 cm	2	11,92	13,92
	3C2	45 - 70 cm	1,51	6,19	7,7
	4Cg	70 - 90 cm	0,39	6,03	6,42
	5Cg	90 a +	1,25	10,12	11,37
M07	A	0 - 12 cm	19,65	72,5	92,15
	Bw	12 - 25 cm	2,36	44,38	46,74
	Bw ₂	25 - 38 cm	0,99	20,15	21,13
	BC	38 - 60 cm	0,59	14,18	14,77
	C	60 - 110 cm	0,44	14,19	14,63

Tabla 3. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (COAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad del orden Inceptisols (perfiles M09, M10, M12, M13 y M15)

Inceptisols					
Perfil	Horizontes	Profundidad	COP (g/kg)	COAM (g/kg)	COT (g/kg)
M09	Ap	0 - 20 cm	28,36	60,39	88,75
	Bw	20 - 40 cm	1,21	18,51	19,72
	C	40 a +	0,78	11,44	12,22
M10	A	0 - 10 cm	9,92	42,34	52,26
	Bw1	10 - 40 cm	1,18	16,7	17,88
	Bw2	40 - 70 cm	1,47	32,25	33,73
	BC	70 a +	0,47	13,31	13,78
M12	A	0 - 15 cm	32,84	48,84	81,68
	Bw1	15 - 30 cm	2,26	17,89	20,14
	Bw2	30 - 50 cm	0,21	10,17	10,38
	Bw3	50 - 70 cm	0,03	2,57	2,6
	Bw4	70 - 100 cm	0,56	3,88	4,44
	BC	100 - 120 cm	0,13	1,34	1,47
M13	A	0 - 8 cm	26,91	57,88	84,79
	Bw1	8 - 20 cm	3,56	21,11	24,67
	Bw2	20 - 40 cm	0,96	16,21	17,17
	Bw3	40 - 60 cm	2,27	8,68	10,95
	BC	60 - 90 cm	0,77	11,74	12,51
	C	90 a +	0,42	10,82	11,23
M15	A	0 - 25 cm	67,9	25,8	93,71
	Bw1	25 - 40 cm	47,64	41,83	89,46
	Bw2	40 - 55 cm	20,41	43,02	63,43
	Bw3	55 - 80 cm	1,38	26,69	28,07
	Bw4	80 - 110 cm	1,16	12,76	13,92
	BC	110 a +	0,35	8,9	9,25

Tabla 4. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a los minerales (COAM) y el carbono orgánico total (COT) de los horizontes evaluados con su respectiva profundidad, con el promedio del orden Entisols (perfiles M01, M03, M08, M11 y M14)

Entisols					
Perfil	Horizontes	Profundidad	COP (g/kg)	COAM (g/kg)	COT (g/kg)
M01	Ap	0 - 10 cm	7,82	7,51	15,33
	C ₁	10 - 18 cm	1,57	5,42	6,99
	2C	18 - 25 cm	1,88	5,81	7,7
	3C	25 - 30 cm	0,78	6,21	6,99
	4C	30 - 40 cm	1,12	4,17	5,29
	5C	40 - 60 cm	1,01	4	5,01
M03	Ap	0 - 13 cm	3,27	26,92	30,19
	AC	13 - 30 cm	4,33	28,97	33,3
	C ₁	30 - 58 cm	4,16	27,59	31,74
	C ₂	58 - 68 cm	7,34	15,35	22,69
	2C	68 - 80 cm	1,38	3,49	4,87
M08	Ap	0 - 8 cm	4,62	4,64	9,25
	C ₁	8 - 16 cm	2,48	4,09	6,56
	C ₂	16 - 30 cm	3,34	2,37	5,72
	2C	30 - 55 cm	9,22	58,46	67,68
	2C ₂	55 - 80 cm	2,21	18,79	20,99
	3C	80 - 100 cm	1,21	2,81	4,02
M11	A	0 - 20 cm	19,11	61,59	80,69
	C ₁	20 - 40 cm	3,92	46,08	49,99
	C ₂	40 - 70 cm	2,07	35,9	37,97
	2C	70 a +	9,74	54,68	64,42
M14	A	0 - 35 cm	32,55	49,56	82,11
	C ₁	35 - 60 cm	3,74	31,54	35,28
	C ₂	60 - 80 cm	1,78	20,06	21,84
	C ₃	80 - 100 cm	1,15	12,62	13,78
	C ₄	100 - 110 cm	0,11	7,17	7,27
	C ₅	110 a +	0,02	3,43	3,45

4.2. Cuantificación del contenido de delta carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) en base a los horizontes con sus respectivas profundidades y la abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en base a sus órdenes

Se verificó en el análisis isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ en base a los perfiles estudiados, ante los resultados se observan rangos de porcentajes que serán contrastados en base a los criterios de Salazar y Silva (2017) donde manifiestan que las plantas con distintas rutas fotosintéticas (C3 y C4) para $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre: C3 (-35 a -20 ‰) y C4 (-19 a -7,5 ‰).

la razón isotópica más alta del suelo está ubicada en el horizonte Bw2 del perfil M05, con una profundidad de 20 a 40 cm, con -15,71 ‰ asociada a vegetación C4 (Tabla 5). Esto puede estar vinculado al uso anterior del suelo o a un ecosistema de especies C4 que aportaron carbono (Costa et al., 2011). La ubicación de este valor en el subsuelo sugiere que hubo un uso previo del suelo dominado por vegetación C4, que contribuyó con carbono a través de raíces y residuos. Con el tiempo, y posiblemente tras un cambio de cobertura hacia especies C3 la capa superficial fue renovando su carbono con aportes más recientes y con una señal isotópica más negativa, mientras que el carbono más antiguo de origen C4 se conservó a mayor profundidad (Krüger et al., 2024). En conjunto, el dato respalda la idea de que el $\delta^{13}\text{C}$ del suelo actúa como un indicador de la historia de la vegetación y del manejo. Este enriquecimiento isotópico en subsuperficie no se explica únicamente por procesos de fraccionamiento durante la descomposición, sino que refleja un aporte sustancial de carbono derivado de plantas C4, cuya señal permanece protegida en esa capa del perfil (Saiz et al., 2015).

Y la más baja en el horizonte C2, perfil M08, con -29,59 ‰ a una profundidad de 16 a 30 cm, valor que pertenece a una planta C3 (Tabla 7). Este valor podría indicar que, en ese horizonte, los aportes de vegetación C3 fueron predominantes en el pasado, o bien que corresponde a una etapa con mayor estabilidad de carbono proveniente de vegetación arbórea antigua (Costa et al., 2011). En síntesis, los valores indican que el carbono en esa capa proviene casi exclusivamente de vegetación C3, probablemente de origen arbóreo, y que ha estado protegido de reemplazos isotópicos por su estabilidad y por un contexto edáfico que favoreció su conservación a largo plazo. Esto lo convierte en un indicador de la historia ecológica del sitio y de la persistencia del carbono estable en el subsuelo (Desjardins et al., 2013).

Las señales isotópicas de vegetación C4 en tres perfiles de Inceptisols se debe a la dinámica geomorfológica y deposicional del paisaje, junto con variaciones ecológicas históricas. Desde la geología del suelo, estos suelos se ubicaron en áreas estables que preservan depósitos orgánicos antiguos, incluyendo aportes de vegetación C4 durante periodos secos o cálidos, o relación con el cultivo de maíz. Esta interpretación coincide con Hunter et al. (2023),

quienes demostraron que la morfología del terreno en gradientes de erosión y deposición controla la acumulación y persistencia de las reservas de C, favoreciendo su estabilización en el suelo. En este contexto, los aportes C4 estarían en el suelo debido a coluviones, arrastre superficial o sedimentación fina que generaron capas con mezcla de materiales C3 y C4.

Tabla 5. $\delta^{13}\text{C}$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Inceptisols

Inceptisols				
Perfil	Horizontes	Profundidad	$\delta^{13}\text{C}$ del suelo (‰)	Fuente
M02	Ap	0 - 20 cm	-26,61	C3
	A2	20 - 33 cm	-23,16	C3
	AB	33 - 50 cm	-19,19	C4
	Bw	50 - 90 cm	-22,79	C3
	BC	90 - 140 cm	-23,35	C3
	C	140 - 175 cm	-24,87	C3
M04	Ap	0 - 5 cm	-26,15	C3
	Bw1	5 - 20 cm	-26,64	C3
	Bw2	20 - 40 cm	-26,08	C3
	Bw3	40 - 60 cm	-26,48	C3
	Bw4	60 - 110 cm	-27,34	C3
	Bw5	110 - 125 cm	-28,54	C3
	BC	125 a +	-28,79	C3
M05	A	0 - 5 cm	-27,88	C3
	Bw1	5 - 20 cm	-27,23	C3
	Bw2	20 - 40 cm	-15,71	C4
	BC	40 - 60 cm	-26,48	C3
	C	60 - 110 cm	-27,4	C3
M06	A	0 - 20 cm	-24,24	C3
	Bw1	20 - 30 cm	-25,79	C3
	2C1	30 - 45 cm	-26,09	C3
	3C2	45 - 70 cm	-27,35	C3
	4Cg	70 - 90 cm	-27,66	C3
	5Cg	90 a +	-28,76	C3
M09	Ap	0 - 20 cm	-27,05	C3
	Bw	20 - 40 cm	-26,12	C3
	C	40 a +	-25,83	C3
M10	A	0 - 10 cm	-27,65	C3
	Bw1	10 - 40 cm	-24,41	C3
	Bw2	40 - 70 cm	-26,58	C3
	BC	70 a +	-27,74	C3

Tabla 6. $\delta^{13}\text{C}$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Inceptisols

Inceptisols				
Perfil	Horizontes	Profundidad	$\delta^{13}\text{C}$ del suelo (‰)	Fuente
M12	A	0 - 15 cm	-17,85	C3
	Bw1	15 - 30 cm	-24,13	C3
	Bw2	30 - 50 cm	-25,23	C3
	Bw3	50 - 70 cm	-25,63	C3
	Bw4	70 - 100 cm	-25,87	C3
	BC	100 - 120 cm	-27,67	C3
M13	A	0 - 8 cm	-25,87	C3
	Bw1	8 - 20 cm	-25,33	C3
	Bw2	20 - 40 cm	-24,24	C3
	Bw3	40 - 60 cm	-23,8	C3
	BC	60 - 90 cm	-23,28	C3
	C	90 a +	-23,84	C3
M15	A	0 - 25 cm	-20,46	C3
	Bw1	25 - 40 cm	-16,59	C4
	Bw2	40 - 55 cm	-16,29	C4
	Bw3	55 - 80 cm	-18,02	C4
	Bw4	80 - 110 cm	-20,35	C3
	BC	110 a +	-22,29	C3
M07	A	0 - 12 cm	-29,13	C3
	Bw	12 - 25 cm	-26,14	C3
	Bw ₂	25 - 38 cm	-26,41	C3
	BC	38 - 60 cm	-26,35	C3
	C	60 - 110 cm	-26,67	C3

Tabla 7. $\delta^{13}\text{C}$ del suelo y tipo de planta como fuente de procedencia de los horizontes evaluados con sus respectivas profundidades del orden Entisols

Entisols				
Perfil	Horizontes	Profundidad	$\delta^{13}\text{C}$ del suelo (‰)	Fuente
M01	Ap	0 - 10 cm	-24,56	C3
	C ₁	10 - 18 cm	-24,68	C3
	2C	18 - 25 cm	-26,75	C3
	3C	25 - 30 cm	-24,23	C3
	4C	30 - 40 cm	-26,17	C3
	5C	40 - 60 cm	-26,68	C3
M03	Ap	0 - 13 cm	-26,1	C3
	AC	13 - 30 cm	-27,59	C3
	C ₁	30 - 58 cm	-27,22	C3
	C ₂	58 - 68 cm	-26,36	C3
	2C	68 - 80 cm	-26,06	C3
M08	Ap	0 - 8 cm	-27,12	C3
	C ₁	8 - 16 cm	-26,82	C3
	C ₂	16 - 30 cm	-29,59	C3
	2C	30 - 55 cm	-27,61	C3
	2C ₂	55 - 80 cm	-26,64	C3
	3C	80 - 100 cm	-27,5	C3
M11	A	0 - 20 cm	-24,93	C3
	C ₁	20 - 40 cm	-27,11	C3
	C ₂	40 - 70 cm	-27,26	C3
	2C	70 a +	-28,25	C3
M14	A	0 - 35 cm	-26,27	C3
	C ₁	35 - 60 cm	-23,45	C3
	C ₂	60 - 80 cm	-20,33	C3
	C ₃	80 - 100 cm	-20,42	C3
	C ₄	100 - 110 cm	-22,1	C3
	C ₅	110 a +	-23,38	C3

A continuación, se detalla los resultados del siguiente objetivo: determinación de la abundancia natural de delta carbono 13 en base a los órdenes encontrados de los suelos evaluados en la topo secuencia del Valle del Monzón:

4.2.1. Inceptisols

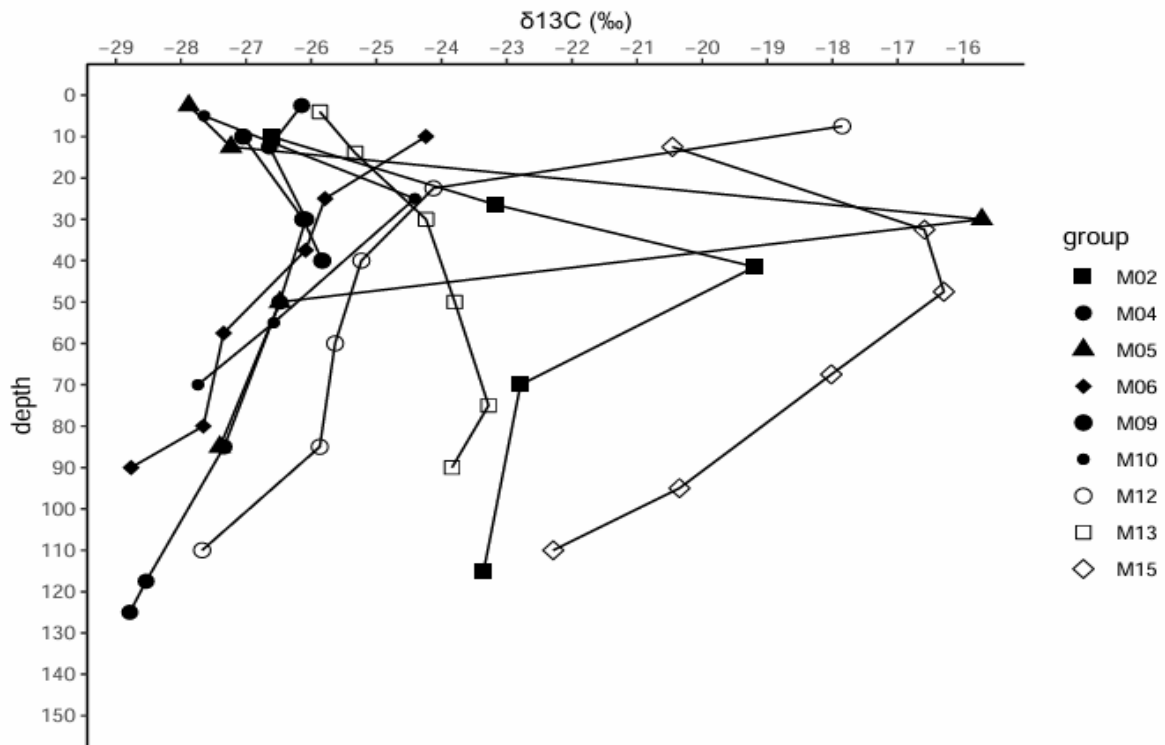


Figura 2. Abundancia natural $\delta^{13}\text{C}$ en base al orden Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06, M09, M10, M12, M13, M15)

En la Figura 2 se visualiza el análisis isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ en base a los perfiles estudiados, ante los resultados se observan rangos de porcentajes que serán contrastados en base a los criterios de Salazar y Silva (2017) donde manifiestan que las plantas con distintas rutas fotosintéticas (C3 y C4) para $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre: C3 (-35 a -20 ‰) y C4 (-19 a 7,5 ‰). La investigación en base a sus perfiles encontró tres órdenes, de los cuales uno de ellos fue el Inceptisols, en la cual los perfiles que encajan en este orden fueron los siguientes M02, M04, M05, M06, M09, M10, M12, M13 y M15. Verificándose en ellos una variación en los niveles isotópicos, algunos más bruscos que otros. En los perfiles M04, M06, M09, M10 y M13 se observa predominancia total de carbono provenientes de plantas C3. Probablemente esto se deba a que existió una pequeña interferencia antrópica en esos perfiles, lo que conlleva a favorecer el incremento de carbono orgánico total y esto se visualiza en los horizontes superficiales (Tabla 3 a y b, Tabla 4 y 5) (Dortzbach et al., 2016). En cambio, los perfiles M02, M05, M12 y M15, muestran una mezcla de carbono C3 y C4, identificando que en sus profundidades 40 - 50 cm, 20 - 40 cm, 0 - 10 cm y 30 - 70 cm respectivamente, se evidencia carbono proveniente de plantas C4, esto es conforme con Dortzbach et al. (2016) esto puede ser

debido a que dichas zonas pudieron haber sido enriquecidos por gramíneas, lo que demuestra que el uso pudo haber favorecido a la estabilidad de MO en esos puntos y también un cambio por actividad antropogénica marcada.

4.2.2. Entisols

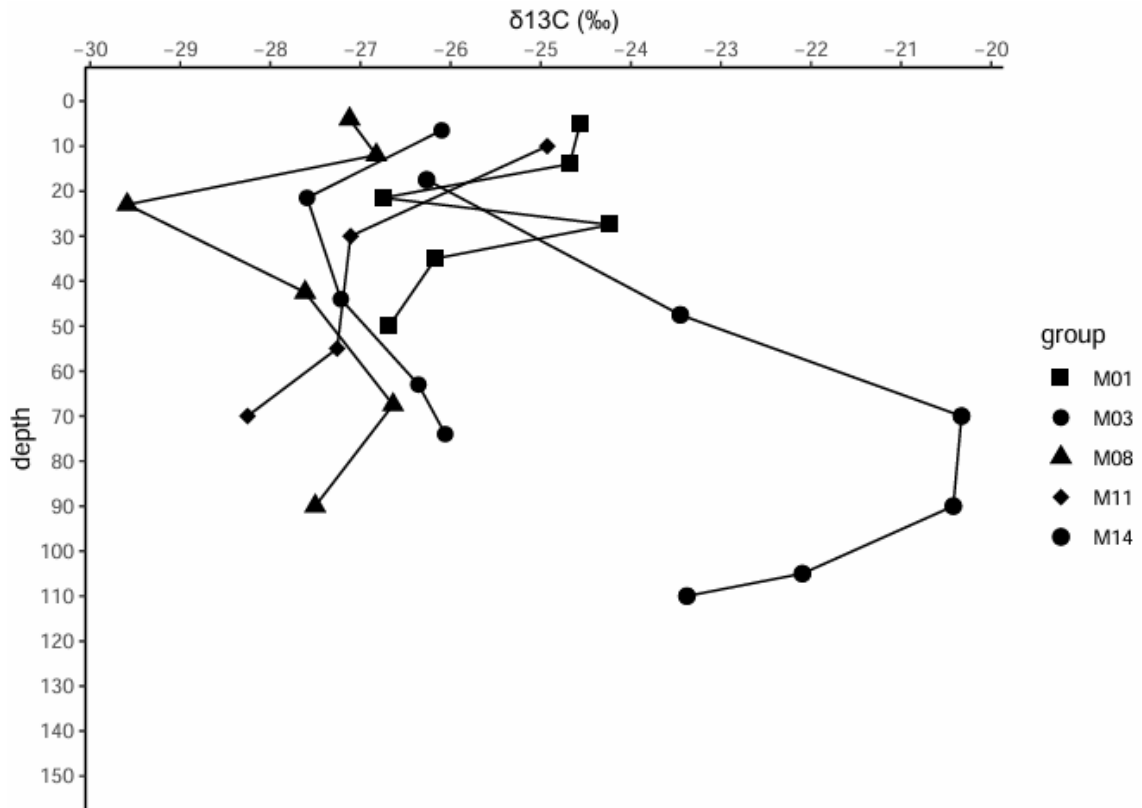


Figura 3. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en los perfiles Entisols (perfiles M01, M03, M08, M11 y M14)

El M01, M03, M08, M11 y M14 fueron clasificados como Entisols, verificándose que poseen una menor formación de un horizonte de diagnóstico, se observa que tienen resultados diferentes que los verificados en los perfiles inceptisols (Figura 3). Así mismo se observa que a lo largo de todas las profundidades hay carbono proveniente de plantas C3, sin embargo, se visualiza en la Figura 3 el cambio brusco del perfil M03 ya sea en su punto superficial (0 a 20 cm) y en el punto de las profundidades de 60 a 70 cm, por lo cual esta característica puede deberse a que hubo una mayor captación de carbono, que pudo haberse debido a la cantidad de materia orgánica en descomposición en el suelo en ese periodo de formación.

4.2.3. Inceptisols

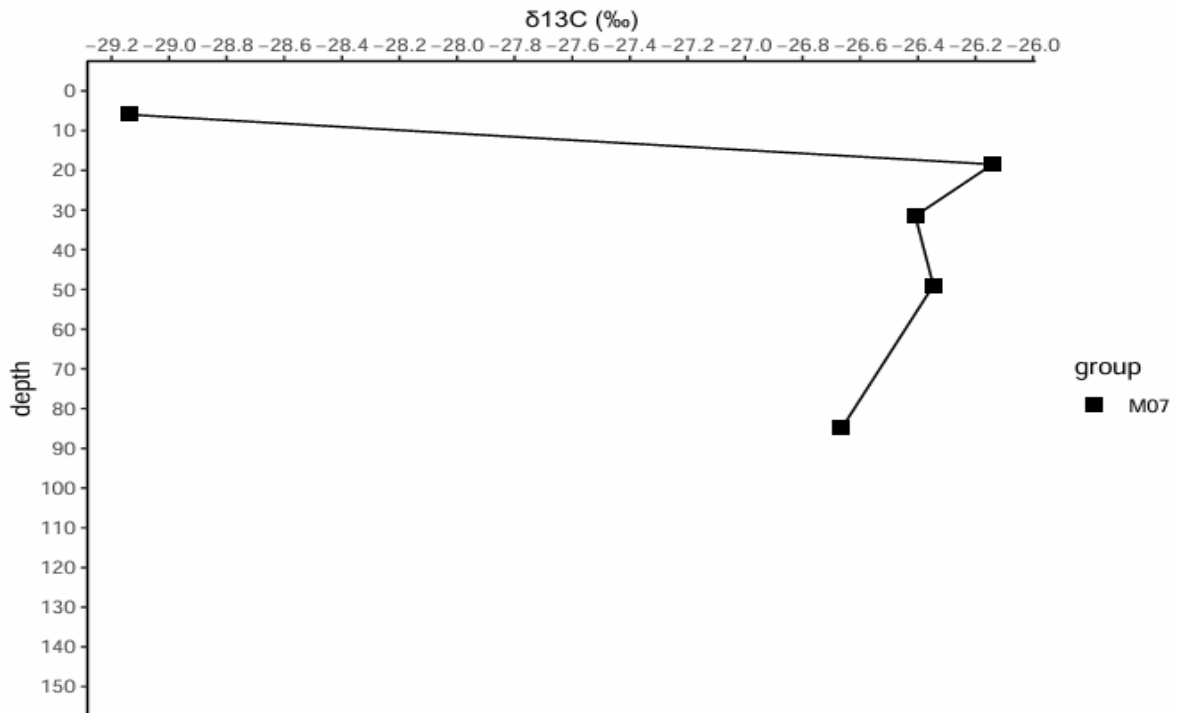


Figura 4. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ en el perfil Inceptisols (perfil M07)

El M07 fue elegido como perfil modelo para tener una visión única de un perfil, para discutirlo individualmente (Figura 4). Observándose que los resultados muestran carbono proveniente de plantas C3 en su totalidad. Verificándose una mayor captación de carbono del punto superficial (0 a 10 cm), al punto que tiene el valor más cercano a cero (dicho punto se ubica entre 10 a 20 cm), con valores de entre -29,2 a -29,0 y -26,2 a -26,0 respectivamente. Conforme con Salazar y Silva (2017), las plantas C3 son carentes de $\delta^{13}\text{C}$ que las plantas C4, debido a la acumulación de materia orgánica, influenciada por la descomposición de plantas, la actividad microbiana, cambios en la vegetación, uso de fertilizantes, factores climáticos y la deposición de sedimentos aluviales en su periodo de formación.

4.3. Determinación de la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4 en base a sus horizontes y profundidad

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ bajo los cultivos actuales encontrados en cada perfil de suelo, bajo sistemas de plantas C3, C4 y mixtas, muestran que van desde -33 ‰ bajo vegetación C3, hasta -13 ‰ bajo vegetación C4 (Figura 5).

En el grupo representado por plantas C3/C4, en general los valores tendieron a disminuir a medida que la profundidad era más superficial, encontrando la mayoría de puntos dentro de los 50 cm o menos, así inclinándose más por el carbono proveniente de plantas C3, puesto que los valores de esta mayoría son más negativos que -20 ‰.

Los valores de uso de suelo donde albergan plantas C4 fueron en su mayoría inferiores a -20‰ de entre 0 a 100 cm, los cuales son valores pertenecientes a plantas C3, lo que sugiere que no hay relación con el cultivo predominante actual. Sin embargo, en los valores obtenidos donde actualmente se practica el uso del suelo con plantas C3 tiene una relación con la mayoría de datos de $\delta^{13}\text{C}$, encontrando así puntos referidos dentro de los 0 a 100 cm de profundidad, de valores entre -21 a -29‰ .

Ahora, la minoría de puntos encontrados bajo los tres sistemas de uso C3, C4 y C3/C4, los cuales tienen valores mayores a -21‰ , sugieren que a profundidades de entre 0 a 75 cm hubo actividad antropogénica con plantas C4, tal vez en su mayoría gramíneas que son plantas que dan como resultados carbonos de C4. Razanamahandry et al. (2022) indica que, si la vegetación C4 hubiera sido dominante durante mucho tiempo, esperando que el $\delta^{13}\text{C}$ en la capa superior del suelo estuviera entre -19 y $-7,5\text{‰}$, con poca variación con la profundidad como se observa en los pocos estudios que documentan perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ del suelo bajo vegetación C4 a largo plazo (Conrad et al., 2017). Así mismo el autor verificó que algunos perfiles con gramíneas tienen valores de $\delta^{13}\text{C}$ en la capa superior que son consistentes con la actual vegetación C4, la mayoría de las muestras de suelo superficial muestran un valor de $\delta^{13}\text{C}$ más bajo de lo que se esperaría para vegetación C4. Esto sugiere que, incluso en la capa superior, la fuente deriva de la vegetación C3.

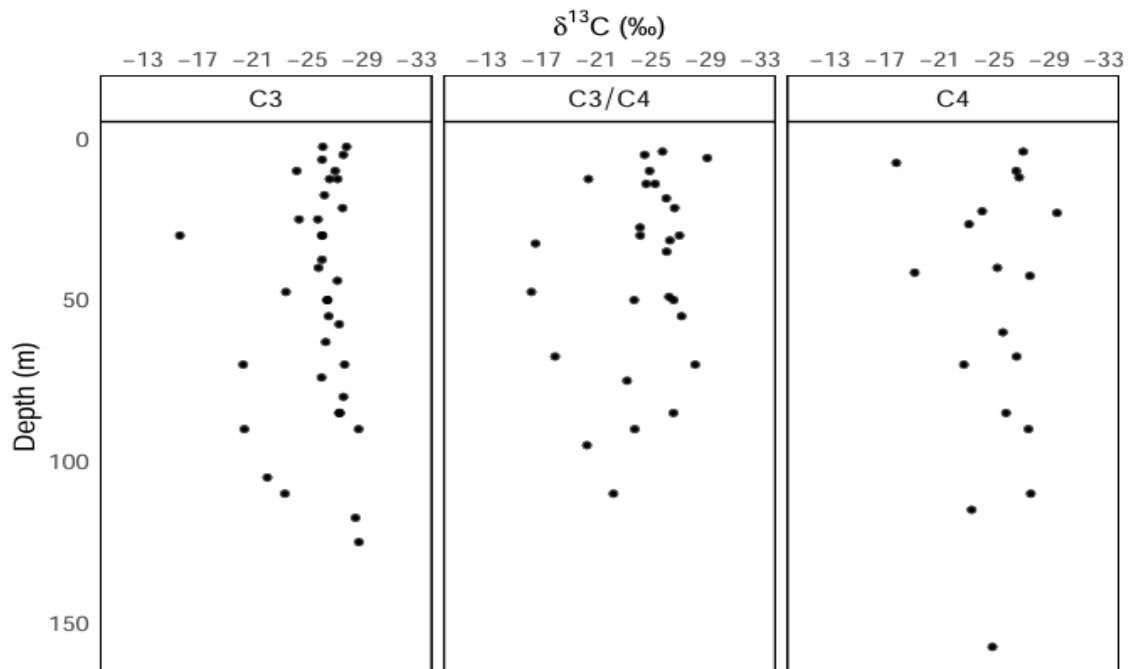


Figura 5. Composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4

4.4. Análisis y determinación de parámetros en los perfiles evaluados.

Tabla 8. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Inceptisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	COT (g/kg)	Stock de carbono (Mg/ha)	pH	Al	CIC	Cultivo
M02/706	Inceptisols	Ap	10YR 3/4	0 - 20 cm	76,73	204,1	4,46	7,5	11,2	Hierbas
		A2	10YR 2/2	20 - 33 cm	66,26	115,43	4,76	8,1	11,21	
		AB	10YR 2/2	33 - 50 cm	49,85	111,87	4,7	7,3	10,29	
		Bw	10YR 6/8	50 - 90 cm	17,88	87,98	4,6	9,2	12,51	
		BC	10YR 6/8	90 - 140 cm	14,34	73,16	4,62	8,6	11,6	
		C	7.5YR 5/8	140 - 175 cm	8,69	30,71	4,61	7,1	10,07	
M04/750	Inceptisols	Ap	5Y 3/4	0 - 5 cm	87,76	53,54	4,44	6,8	9,89	Coca
		Bw1	5Y 4/4	5 - 20 cm	55,65	85,15	4,56	4,8	9,15	
		Bw2	5Y 4/4	20 - 40 cm	31,74	64,12	4,42	4,7	7,06	
		Bw3	5Y 4/4	40 - 60 cm	24,39	51,22	4,27	3,7	5,49	
		Bw4	5Y 4/4	60 - 110 cm	8,26	45,44	4,79	3,7	6,79	
		Bw5	5Y 4/4	110 - 125 cm	7,84	12,58	4,81	3,9	5,69	
		BC	5Y 4/4	125 a +	7,27	20,36	4,92	3,6	6,42	
M05/732	Inceptisols	A	7.5YR 2.5/3	0 - 5 cm	72,06	48,64	4,66	3,5	8,15	Coca
		Bw1	7.5YR 3/4	5 - 20 cm	38,39	69,68	4,28	4,2	9,09	
		Bw2	7.5YR 4/4	20 - 40 cm	37,12	91,32	4,43	3,6	8,19	
		BC	7.5YR 3/4	40 - 60 cm	17,03	34,75	4,39	4,1	8,32	
		C	5YR 3/3	60 - 110 cm	7,98	41,09	4,78	3,3	8,55	
M06/707	Inceptisols	A	7.5YR 2.5/2	0 - 20 cm	71,21	192,27	5,2	3,8	10,43	Cacao
		Bw1	7.5YR 4/4	20 - 30 cm	24,81	30,77	4,56	4,2	10	
		2C1	7.5YR 4/6	30 - 45 cm	13,92	21,3	4,58	4,5	9,8	
		3C2	7.5YR 4/6	45 - 70 cm	7,7	19,82	4,56	5,2	9,82	
		4Cg	7.5YR 5/6	70 - 90 cm	6,42	13,36	5,05	3,5	9,09	
		5Cg	7.5YR 5/6	>90	11,37	35,83	4,68	6,3	11,25	
M09/740	Inceptisols	Ap	10Y 3/4	0 - 20 cm	88,75	218,34	4,68	3,2	7,51	Cacao
		Bw	10Y 6/8	20 - 40 cm	19,72	40,23	4,79	2,9	7,18	
		C	10Y 6/8	>40	12,22	30,56	4,67	3,5	7,12	
M10/769	Inceptisols	A	7.5YR 4/4	0 - 10 cm	52,26	63,75	3,57	2,22	5,7	Coca
		Bw1	5YR 5/6	10 - 40 cm	17,88	56,33	3,67	2,15	5,45	
		Bw2	5YR 5/8	40 - 70 cm	33,73	108,26	3,82	1,85	5,32	
		BC	5YR 5/8	>70	13,78	90,25	4,02	1,2	5,46	

Tabla 9. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Inceptisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	COT (g/kg)	Stock de carbono (Mg/ha)	pH	Al	CIC	Cultivo
M12/734	Inceptisols	A	10YR 5/4	0 - 15 cm	81,68	153,15	4,26	2,33	5,98	Pastos
		Bw1	10YR 7/6	15 - 30 cm	20,14	32,63	4,16	2,41	5,66	
		Bw2	10YR 7/4	30 - 50 cm	10,38	27,21	4,85	1,39	5,8	
		Bw3	10YR 7/6	50 - 70 cm	2,6	6,92	4,72	0,89	5,45	
		Bw4	10YR 6/4	70 - 100 cm	4,44	17,99	4,75	0,88	5,33	
		BC	10YR 7/2	100 - 120 cm	1,47	20,01	4,77	0,78	5,67	
M13/720	Inceptisols	A	5YR 4/6	0 - 8 cm	84,79	82,08	4,48	3,21	5,2	Purma secundaria
		Bw1	5YR 5/8	8 - 20 cm	24,67	11,15	4,38	2,72	4,58	
		Bw2	5YR 5/8	20 - 40 cm	17,17	38,13	4,58	2,35	4,35	
		Bw3	5YR 5/8	40 - 60 cm	10,95	24,53	5,04	2,22	4,21	
		BC	5YR 5/8	60 - 90 cm	12,51	42,39	4,86	1,98	3,62	
		C	5YR 5/8	>90	11,23	48,07	4,83	1,93	3,16	
M15/975	Inceptisols	A	10YR 3/4	0 - 25 cm	93,71	295,3	4,86	7,23	11,64	Purma secundaria
		Bw1	10YR 3/6	25 - 40 cm	89,46	165,06	4,15	11,1	14,55	
		Bw2	10YR 3/6	40 - 55 cm	63,43	115,13	4,45	8,09	11,85	
		Bw3	7.5YR 5/8	55 - 80 cm	28,07	77,18	4,28	7,11	10,15	
		Bw4	7.5YR 5/8	80 - 110 cm	13,92	45,52	4,69	7	10,11	
		BC	7.5YR 5/8	>110	9,25	27,76	4,77	6,78	9,7	
M07/734	Inceptisols	A	5YR 3/3	0 - 12 cm	92,15	133,8	5,86	2,3	8,18	Purma baja
		Bw	5YR 3/4	12 - 25 cm	46,74	74,74	5,65	2,2	7,9	
		Bw2	2.5YR 2.5/4	25 - 38 cm	21,13	28,02	5,5	2,5	8,07	
		BC	2.5YR 4/6	38 - 60 cm	14,77	33,47	5,68	2,1	7,72	
		C	2.5YR 3/6	60 - 110 cm	14,63	76,06	5,48	1,5	6,97	

Tabla 10. Altitud, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados del orden Entisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	COT (g/kg)	Stock de carbono (Mg/ha)	pH	Al	CIC	Cultivo
M01/675	Entisols	Ap	5Y 2.5/2	0 - 10 cm	15,33	20,7	6,14	0,5	7,89	Yuca
		C ₁	5Y 3/2	10 - 18 cm	6,99	9,39	6,01	0,3	6,93	
		2C	5Y 3/2	18 - 25 cm	7,7	6,9	6,01	0,1	6,75	
		3C	5Y 2.5/2	25 - 30 cm	6,99	4,82	5,38	0,09	6,03	
		4C	5Y 3/2	30 - 40 cm	5,29	8,04	5,76	0,1	6,53	
		5C	5Y 4/2	40 - 60 cm	5,01	16,93	6,63	0,1	6,85	
M03/698	Entisols	Ap	7.5YR 2.5/3	0 - 13 cm	30,19	49,06	4,81	1,3	7,51	Cacao
		AC	7.5YR 3/3	13 - 30 cm	33,3	69,07	4,78	1,56	7,05	
		C ₁	5Y 4/2	30 - 58 cm	31,74	152,88	4,8	1	6,99	
		C ₂	5Y 3/2	58 - 68 cm	22,69	36,53	5,49	0,98	6,82	
		2C	5Y 4/3	68 - 80 cm	4,87	5,96	5,61	0,87	7,09	
M08/718	Entisols	Ap	5Y 4/2	0 - 8 cm	9,25	9,99	6,32	0	7	Maíz
		C ₁	5Y 3/2	8 - 16 cm	6,56	7,67	6,48	0	6,35	
		C ₂	5Y 4/2	16 - 30 cm	5,72	10,72	6,79	0	6,15	
		2C	5Y 4/1	30 - 55 cm	67,68	230,1	5,85	0,06	6,3	
		2C ₂	5Y 5/1	55 - 80 cm	20,99	77,68	5,94	0,04	5,95	
		3C	5Y 3/2	80 - 100 cm	4,02	12,78	6,2	0,04	5,87	
M11/753	Entisols	A	10YR 3/3	0 - 20 cm	80,69	217,87	4,9	0,9	5,7	Yuca
		C ₁	10YR 5/4	20 - 40 cm	49,99	164,98	5,12	0,42	5,51	
		C ₂	2.5Y 5/4	40 - 70 cm	37,97	189,09	5,23	0,38	5,5	
		2C	5Y 2.5/1	>70	64,42	332,42	4,78	0,92	5,05	
M14/765	Entisols	A	10YR 3/3	0 - 35 cm	82,11	416,69	5,56	0	7,45	Cacao
		C ₁	10YR 3/6	35 - 60 cm	35,28	145,53	4,88	0	7,2	
		C ₂	10YR 4/6	60 - 80 cm	21,84	59,85	4,69	0,18	5,34	
		C ₃	10YR 5/6	80 - 100 cm	13,78	37,2	4,57	0,38	5,19	
		C ₄	10YR 5/6	100 - 110 cm	7,27	10,03	4,64	0	5,07	
		C ₅	10YR 5/6	>110	3,45	14,08	4,35	0,22	4,99	

En la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se observa que los Entisols de las áreas estudiadas presentan características poco desarrolladas, poca materia orgánica y probablemente estas características se deban a suelos en constantes cambios ya que se localizan en zona de erosión y cercanas a las riberas de los ríos. Para las características de los Inceptisols, se obtuvo que, la capacidad de intercambio catiónica (CIC) es de media a baja.

Los horizontes superficiales de los perfiles, tienden a tener más contenido de Carbono orgánico total (COT), que en caso de los Inceptisols y Entisols está dentro de un promedio de profundidad de los 20 a 30 cm. Resultados de tendencia diferente fueron encontrados por Carvajal et al. (2009) al observar en perfiles de 0 a 30 cm donde hubo incrementos de carbono en relictos de selva, es decir estos suelos aumentaron su cantidad cuando pasaron a tener la presencia de cultivos de café y plátano.

El stock de carbono tuvo variaciones notables de una profundidad a otra, en el perfil M01, el cual es un Entisols se ha obtenido los resultados más altos de stock de carbono en la superficie de 0 a 10 cm con 20,70 Mg/ha (Tabla 10). Y en caso de los Inceptisols, se ha encontrado que los valores bajan gradualmente con la profundidad, sin embargo, también se encuentra datos como el del perfil M05 (Tabla 8), que de 0 a 5 cm hay 4,64 Mg/ha y aumenta gradualmente de 20 a 40 cm con 91,32 Mg/ha para luego volver a disminuir.

El perfil M15 tiene el COT más abundante (Tabla 9), con un valor de 93,71 g/kg, el cual está a una profundidad de 0 a 25 cm, siendo este un Inceptisols. En el M14 se encontró el valor 3,45 g/kg de COT a una profundidad de 110 cm a más, siendo este el valor más bajo de los perfiles evaluados (Tabla 10).

Tal como se muestran en los resultados anteriores la mayor parte de stock de carbono se encuentra en la parte superficial del suelo, lo que concuerda con el estudio realizado por Vargas et al. (2023), donde resultó que la proporción de carbono más baja se encontró en la capa de suelo de 30 a 60 cm, el stock de carbono fue altamente variable y se presentó en un rango de 12,3 a 467,5 Mg/ha en los primeros 30 cm de profundidad, y de 1,9 a 254,1 Mg/ha de los 30 a 60 cm. Alrededor de 70 % del stock de carbono se almacena en los primeros 30 cm de profundidad. Y de acuerdo con el estudio realizado por Paz y Etchevers (2016) El COT en los primeros 30 cm de profundidad, en relación al primer metro, representa alrededor de 50 %.

En cuanto a los valores de pH, se observó que las muestras de suelos Entisols muestran valores menos ácidos a comparación de los Inceptisols, como en el perfil M08 (Tabla 10) que a una profundidad de 16 a 30 cm se observó que tiene un pH de 6,79 el menos ácido de todas las muestras, de forma contraria pasa en el perfil M10 (Tabla 8) el cual tiene el valor más ácido de todas las muestras, con un valor de 3,57 con una profundidad de 0 a 10 cm. El perfil M07

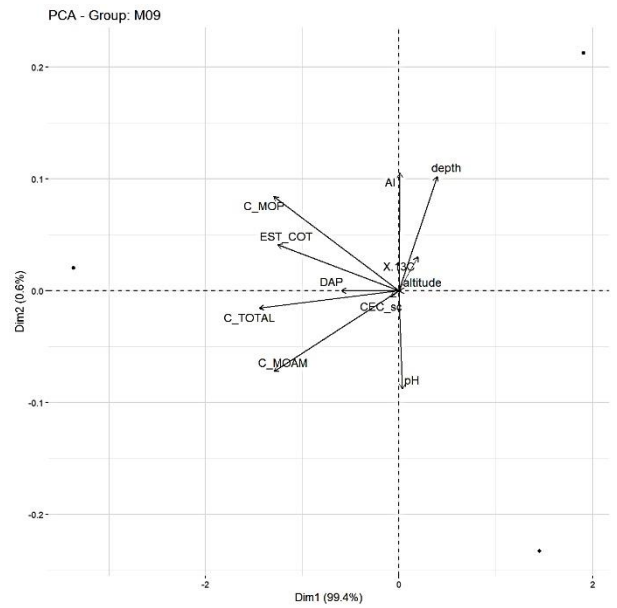
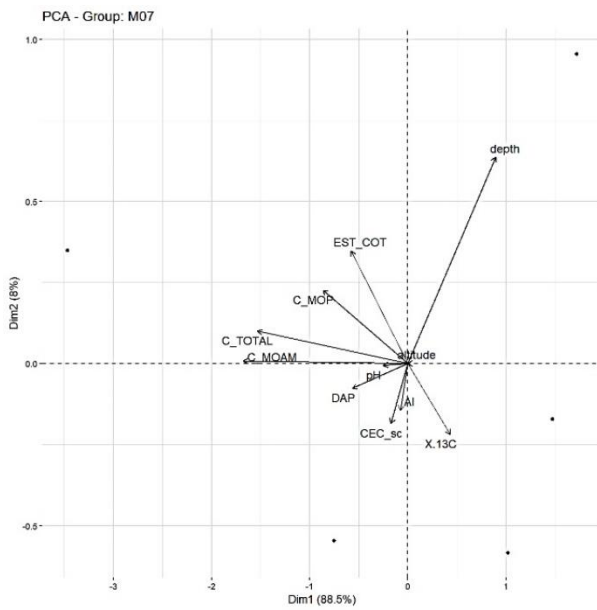
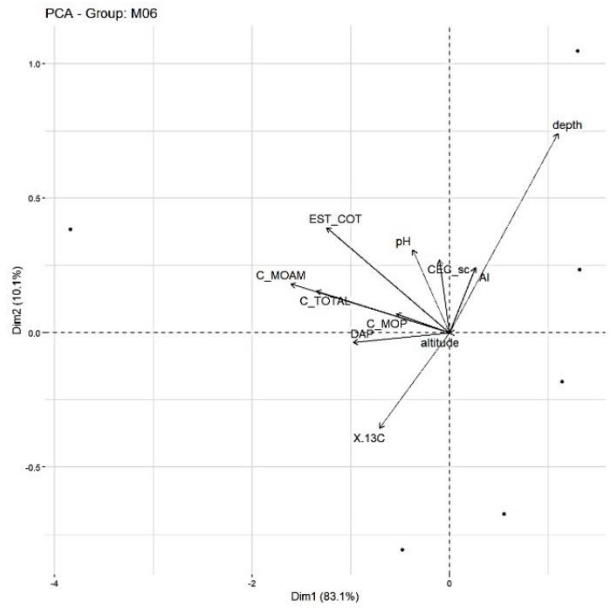
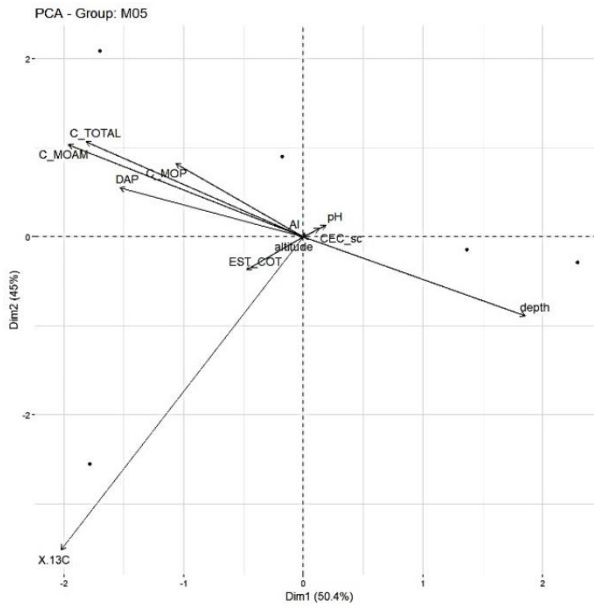
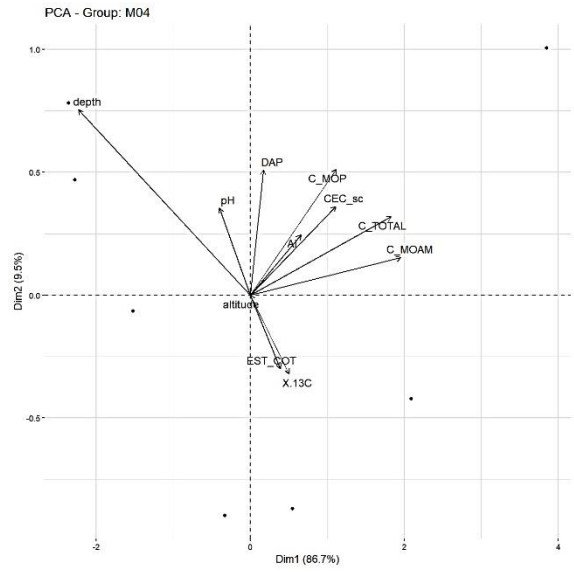
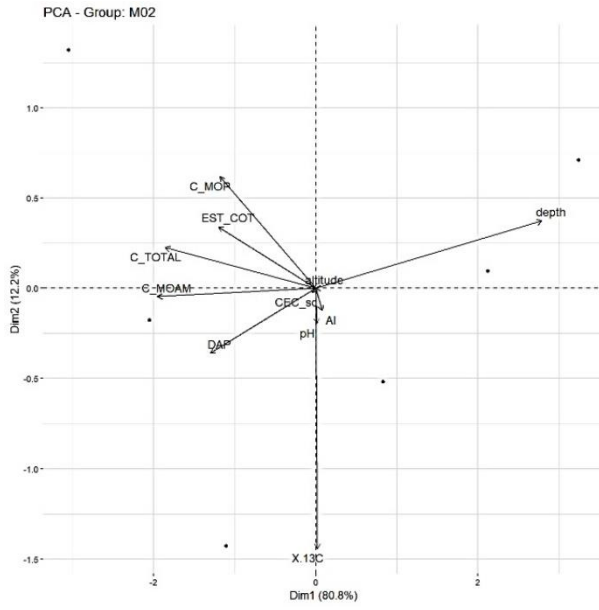
presentó valores de pH de 5,48 a 5,86 (Tabla 9), niveles considerables para la disponibilidad de nutrientes. El perfil M15 presentó mayor CIC con un valor de 14,55 a una profundidad de 25 a 40 cm y M02 Bw tiene el valor más alto de Al con 9,20. M13C tiene 3,16 de CIC, siendo el más bajo de todos. M08Ap, C1 y C2; M14 A, C1 y C4 presentan el valor de 0,00, el más bajo de Al (López et al., 2019; Cruz et al., 2020).

Algunos perfiles presentaron mayor stock de carbono en profundidad porque las capas subsuperficiales poseen mayor espesor y densidad aparente, lo que incrementa la capacidad de almacenar carbono. Además, en los Entisols se identificaron horizontes C con depósitos aluviales o material orgánico enterrado, los cuales conservan carbono más antiguo y estable. El manejo agrícola actual empobrece el horizonte superficial, reduciendo su COT y su stock, mientras que las capas profundas mantienen o acumulan carbono asociado a minerales (COAM), lo que incrementa su contribución al stock total. En conjunto, estos factores explican que el stock profundo supere al superficial en varios perfiles evaluados.

4.5. Determinación del análisis de componentes principales (ACP) en base a los perfiles

Por medio del análisis biplot bidimensional APC realizada en los 15 perfiles, se verificó que el modelo explica más del 75 % de los resultados encontrados (Figura 6). En los perfiles M01, M02, M05, M06, M10 y M14 el $\delta^{13}\text{C}$ no tiene relación con ningún otro componente. En los perfiles M03, M07, M08, M09, M11, M12 y M15 se observó que la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$, Al, CIC y profundidad es aproximada.

Dentro de todos los perfiles se ha verificado que las mayores correlaciones de $\delta^{13}\text{C}$ con alguna otra variable han sido en el M04, que tiene correlación positiva con stock de carbono, donde la Dim 1 explica el 86,71 % de la información, M12, que tiene una estrecha correlación con el COAM, donde la Dim 1 explica el 86,6 % de la información y M15, donde hay correlación con el COAM, donde la Dim 1 explica el 84,6 % de la información. En M13 encontramos una correlación positiva entre pH y profundidad, los cuales también tiene mayor correlación entre ellas que con el $\delta^{13}\text{C}$, información explicada al 85,3 % por la Dim 1. Finalmente, en el perfil M09 se observó que el $\delta^{13}\text{C}$ tiene correlación positiva con Al y profundidad, la información fue explicada por la Dim 1 al 99,4 % (Dofrtzbach et al., 2015).



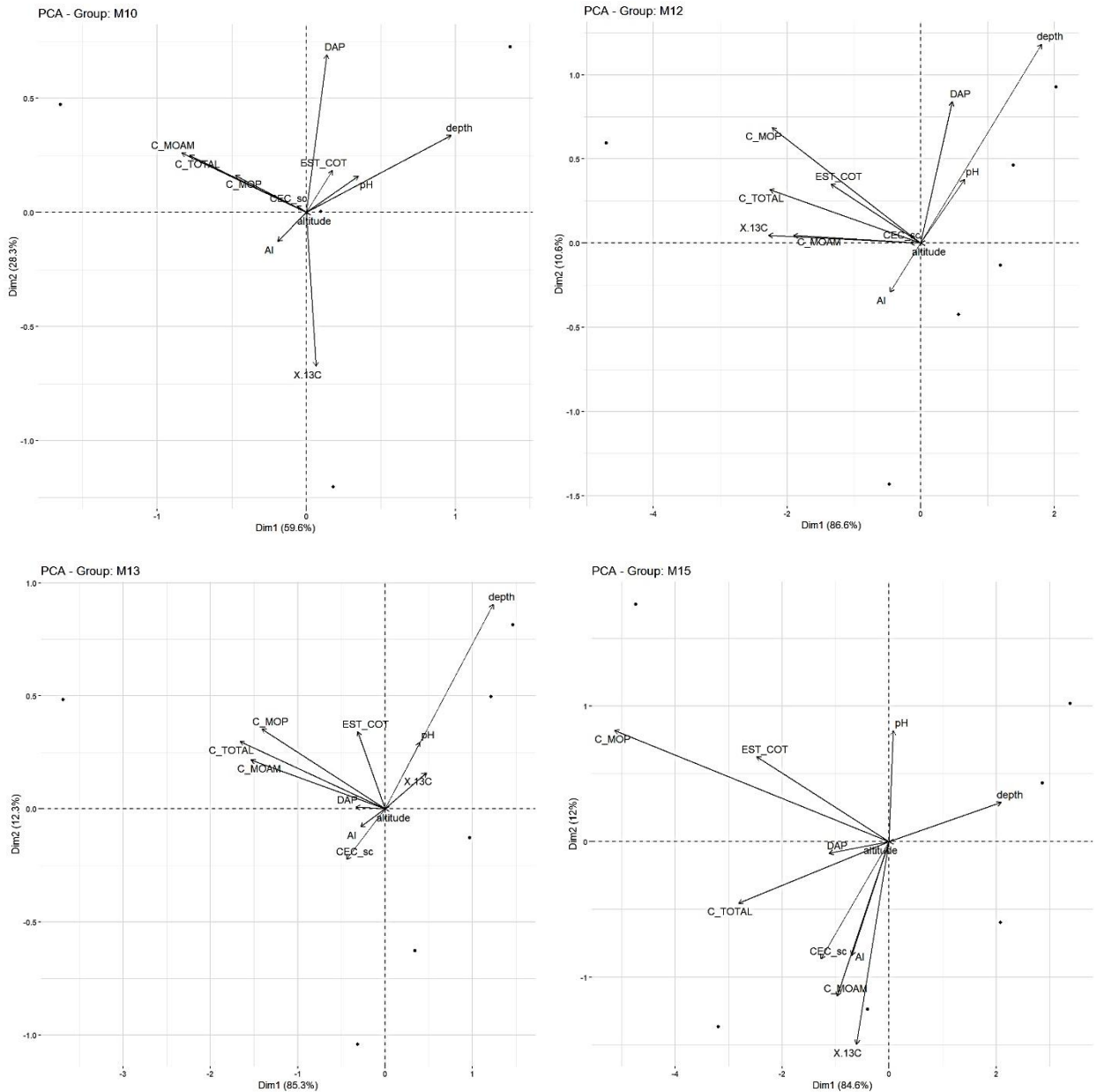


Figura 6. Gráfico biplot bidimensional ACP para carbono orgánico total (COT), stock de carbono, profundidad, altitud, pH, Al, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DAP), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM) y $\delta^{13}C$. Dim 1 (componente principal 1) y Dim 2 (componente principal 2) del orden Inceptisols

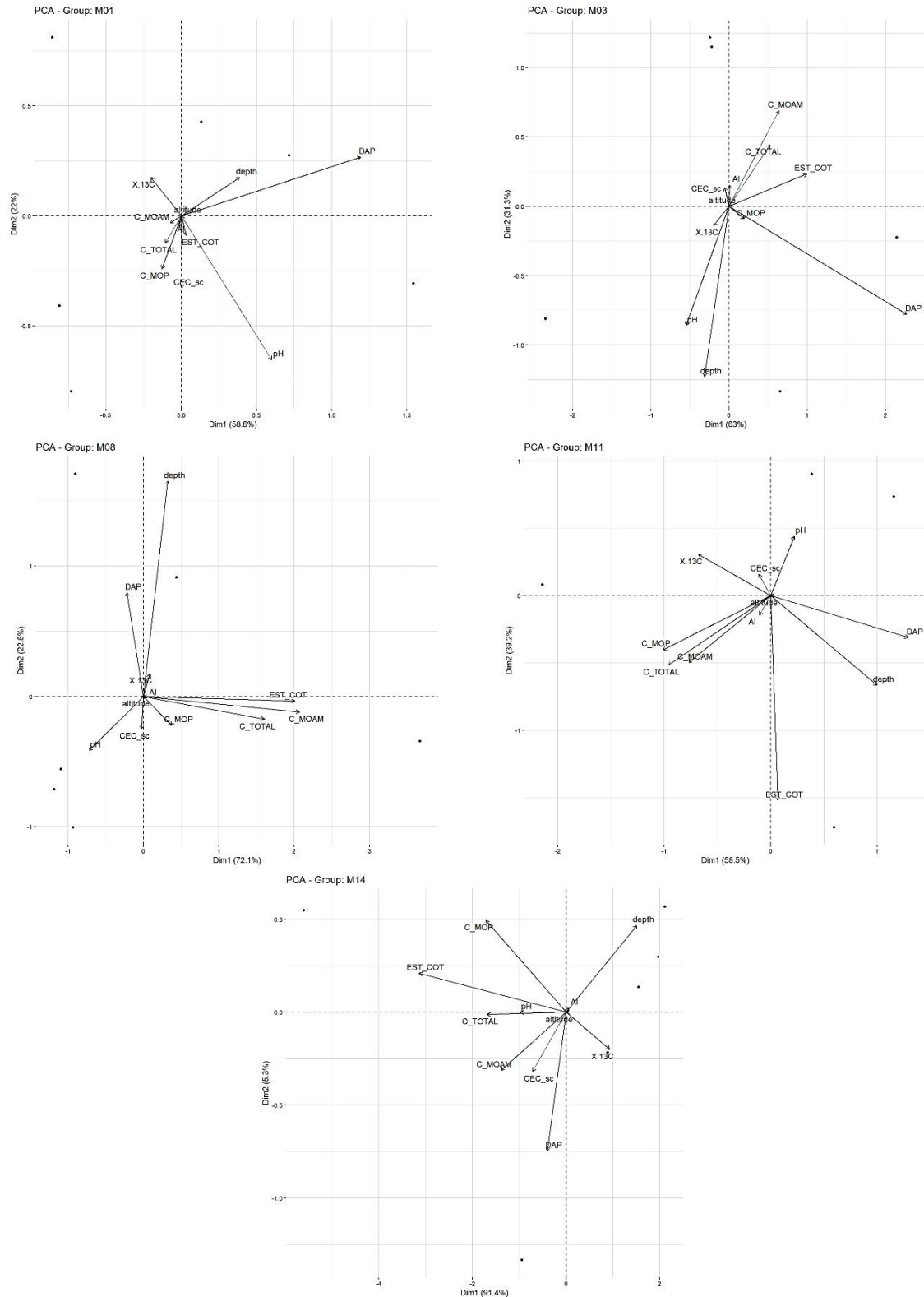


Figura 7. Gráfico biplot bidimensional ACP para carbono orgánico total (COT), stock de carbono, profundidad, altitud, pH, Al, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DAP), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM) y $\delta^{13}\text{C}$. Dim 1 (componente principal 1) y Dim 2 (componente principal 2) del orden Entisols

En los perfiles M02 y M12 (Figura 6), el COAM no tiene relación con ningún otro componente, de igual manera sucede en los perfiles M03 y M14 para el COP (Figura 7). En los perfiles M01, M05, M06, M07, M10, M11 y M13 se verificó una estrecha relación entre COAM, COP y COT.

El COAM y COT tienen correlación en los perfiles M03, M04, M08 y M09, y para el COP la correlación con el COT se logró verificar en M08 (Figura 6 y 7). Se evidencia que el COP tiene correlación con el stock de carbono en los perfiles M02, M09, M12 y M13, siendo este el que más correlación mostró con el stock de carbono (Figura 6).

El COAM mostró correlación con el CIC y Al en los perfiles M14 y M15 respectivamente. Donde la Dim 1 explicó la información en un 91,4 % y 84,6 % (Figura 6 y 7). Para el COP se verificó correlación positiva con los componentes CIC y Al en el perfil M04, donde la Dim 1 explicó el 86,7 % de la información (Figura 6).

La mayor parte de la variación de los datos es explicada por la Dim 1 cuyo menor valor fue observado en el perfil M05, explicando el 50,4 % de la información, pero llegando al 99,4 % de toda la variación en el M09 (Figura 6).

La variación con respecto a la altitud está alejada de las demás variables, ubicada siempre en el centro (Figura 6), como si fuera independiente, pudiéndose afirmar que no tiene correlación con ningún otro atributo, esto se debe a que la topo secuencia del Valle del Monzón presenta un rango altitudinal relativamente estrecho, lo que genera muy poca variabilidad para el APC.

Por la dispersión de los datos en los gráficos se verificó que no todos los perfiles muestran una fuerte correlación entre los componentes COT y stock de carbono, lo que difiere con los datos obtenidos por Dofrtzbach et al. (2015), donde afirman en su investigación que, las variables COT y stock de carbono están fuertemente correlacionadas entre sí en todas las capas.

4.6. Determinación de la correlación de Pearson entre los parámetros de estudio

Tabla 11. Correlación de Pearson entre las variables carbono orgánico total (COT), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM), stock de carbono, densidad aparente (Da), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), $\delta^{13}\text{C}$, altitud, Al, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, MO, arena, limo, arcilla y profundidad.

	COT (g/kg)	COP (g/kg)	COAM (g/kg)	Stock de carbono (Mg/ha)	Da (gr/cm³)	pH	CIC (meq/100 g)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Altitud (m.s.n.m)	Al (meq/100 g)
COT (g/kg)	1,00	0,82	0,94	0,77	0,15	-0,20	0,32	0,18	0,26	0,30
COP (g/kg)	0,82	1,00	0,58	0,65	0,12	-0,11	0,37	0,29	0,41	0,33
COAM (g/kg)	0,94	0,58	1,00	0,71	0,15	-0,22	0,24	0,08	0,13	0,24
Stock de C (Mg/ha)	0,77	0,65	0,71	1,00	0,33	-0,09	0,18	0,11	0,25	0,11
Da (gr/cm³)	0,15	0,12	0,15	0,33	1,00	0,42	-0,22	-0,06	-0,17	-0,48
pH	-0,20	-0,11	-0,22	-0,09	0,42	1,00	-0,12	-0,32	-0,33	-0,48
CIC (meq/100 g)	0,32	0,37	0,24	0,18	-0,22	-0,12	1,00	0,31	0,35	0,82
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	0,18	0,29	0,08	0,11	-0,06	-0,32	0,31	1,00	0,55	0,41
Altitud (m.s.n.m)	0,26	0,41	0,13	0,25	-0,17	-0,33	0,35	0,55	1,00	0,47
Al (meq/100 g)	0,30	0,33	0,24	0,11	-0,48	-0,48	0,82	0,41	0,47	1,00
P (ppm)	0,48	0,26	0,53	0,26	0,02	-0,17	0,11	-0,22	-0,14	-0,05
Ca (meq/100 g)	-0,07	-0,05	-0,07	0,06	0,53	0,72	-0,01	-0,32	-0,39	-0,56
Mg (meq/100 g)	0,12	0,08	0,13	0,15	0,37	0,40	-0,12	-0,23	-0,28	-0,52
K (meq/100 g)	0,25	0,06	0,32	0,18	0,19	0,18	-0,13	-0,30	-0,45	-0,40
Na (meq/100 g)	0,02	-0,01	0,03	0,01	0,14	0,07	-0,11	0,03	-0,08	-0,18
H + Al (meq/100 g)	0,28	0,31	0,22	0,10	-0,48	-0,51	0,81	0,43	0,51	0,99
MO (%)	0,58	0,57	0,48	0,42	0,00	-0,32	0,44	0,44	0,28	0,46
Arena (%)	0,02	-0,02	0,04	0,22	0,71	0,35	-0,09	-0,02	-0,20	-0,36
Limo (%)	0,24	0,19	0,24	0,07	-0,07	0,06	0,08	-0,07	-0,01	0,06
Arcilla (%)	-0,25	-0,15	-0,27	-0,33	-0,80	-0,49	0,04	0,09	0,25	0,39
Profundidad (cm)	-0,56	-0,45	-0,54	-0,28	-0,18	-0,10	-0,06	0,03	0,14	0,10

Tabla 12. Correlación de Pearson entre las variables carbono orgánico total (COT), carbono de la materia orgánica particulada (COP), carbono de la materia orgánica asociada a los minerales (COAM), stock de carbono, densidad aparente (Da), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), $\delta^{13}\text{C}$, altitud, Al, P, Ca, Mg, K, Na, H+Al, MO, arena, limo, arcilla y profundidad.

	P (ppm)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	K (meq/100 g)	Na (meq/100 g)	H + Al (meq/100 g)	MO (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Profundidad (cm)
COT (g/kg)	0,48	-0,07	0,12	0,25	0,02	0,28	0,58	0,02	0,24	-0,25	-0,56
COP (g/kg)	0,26	-0,05	0,08	0,06	-0,01	0,31	0,57	-0,02	0,19	-0,15	-0,45
COAM (g/kg)	0,53	-0,07	0,13	0,32	0,03	0,22	0,48	0,04	0,24	-0,27	-0,54
Stock de C (Mg/ha)	0,26	0,06	0,15	0,18	0,01	0,10	0,42	0,22	0,07	-0,33	-0,28
Da (gr/cm³)	0,02	0,53	0,37	0,19	0,14	-0,48	0,00	0,71	-0,07	-0,80	-0,18
pH	-0,17	0,72	0,40	0,18	0,07	-0,51	-0,32	0,35	0,06	-0,49	-0,10
CIC (meq/100 g)	0,11	-0,01	-0,12	-0,13	-0,11	0,81	0,44	-0,09	0,08	0,04	-0,06
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-0,22	-0,32	-0,23	-0,30	0,03	0,43	0,44	-0,02	-0,07	0,09	0,03
Altitud (m.s.n.m)	-0,14	-0,39	-0,28	-0,45	-0,08	0,51	0,28	-0,20	-0,01	0,25	0,14
Al (meq/100 g)	-0,05	-0,56	-0,52	-0,40	-0,18	0,99	0,46	-0,36	0,06	0,39	0,10
P (ppm)	1,00	0,21	0,55	0,50	0,12	-0,06	0,36	-0,09	0,30	-0,17	-0,53
Ca (meq/100 g)	0,21	1,00	0,68	0,54	0,17	-0,60	-0,22	0,56	-0,02	-0,67	-0,29
Mg (meq/100 g)	0,55	0,68	1,00	0,56	0,23	-0,52	0,03	0,18	0,33	-0,53	-0,48
K (meq/100 g)	0,50	0,54	0,56	1,00	0,30	-0,44	-0,05	0,19	0,20	-0,42	-0,59
Na (meq/100 g)	0,12	0,17	0,23	0,30	1,00	-0,20	0,02	0,01	0,28	-0,28	-0,21
H + Al (meq/100 g)	-0,06	-0,60	-0,52	-0,44	-0,20	1,00	0,47	-0,40	0,06	0,43	0,14
MO (%)	0,36	-0,22	0,03	-0,05	0,02	0,47	1,00	-0,07	0,19	-0,08	-0,31
Arena (%)	-0,09	0,56	0,18	0,19	0,01	-0,40	-0,07	1,00	-0,60	-0,66	-0,04
Limo (%)	0,30	-0,02	0,33	0,20	0,28	0,06	0,19	-0,60	1,00	-0,20	-0,38
Arcilla (%)	-0,17	-0,67	-0,53	-0,42	-0,28	0,43	-0,08	-0,66	-0,20	1,00	0,41
Profundidad (cm)	-0,53	-0,29	-0,48	-0,59	-0,21	0,14	-0,31	-0,04	-0,38	0,41	1,00

En la Tabla 11 y 12 de acuerdo con la correlación de Pearson se observan correlaciones fuertes y positivas de COT con stock de carbono, COP y COAM, teniendo con este último componente el valor más alto de todas las correlaciones (0,9407). Se visualiza que el COP tiene una correlación media con respecto a los componentes COAM y stock de carbono, con valores de 0,5813 y 0,6504 respectivamente, pero alta con el COT (0,8227).

Esto sugiere que el COT está fuertemente influenciado por la fracción mineral estable de la materia orgánica, lo cual es esperable, ya que el COAM representa una forma más estable y persistente del carbono en el suelo. Por otro lado, el COP muestra una correlación alta con el COT, pero solo media con el COAM y el stock, lo que indica que esta fracción particulada, aunque importante, tiene una relación menos directa con el almacenamiento total de carbono (Manzoni y Cotrufo, 2024).

Y por último se observa una correlación entre Al y CIC con un valor de 0,8198, las demás correlaciones fueron bajas y/o negativas. Ouyang et al. (2023), indica que, el Al compite con otros cationes, reduciendo la CIC para retener y liberar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y que el stock de carbono es el resultado de la integración del COT en un volumen o área específica.

V. CONCLUSIONES

1. El COT presentó valores altos en horizontes superficiales (0 a 25 cm), alcanzando 93,71 g/kg en el M15, horizonte A, con una disminución progresiva a profundidad. El COP se concentró en la capa superficial, reflejando su carácter lábil y su respuesta a cambios en el manejo del suelo. El COAM mostró predominio a profundidades mayores, evidenciando su asociación con el limo y arcilla, y la fijación de C a largo plazo.
2. El $\delta^{13}C$ varió entre -15,71 ‰ (vegetación C4) y -30,57 ‰ (vegetación C3), con un patrón de enriquecimiento isotópico a más profundidad. La abundancia natural de $\delta^{13}C$ mostró diferencias entre órdenes, reflejando la historia de uso del suelo, donde los perfiles del suelo Inceptisols mostraron carbono C3 y C4, y los Entisols solo C3.
3. La composición isotópica de $\delta^{13}C$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4 en base a los horizontes, mostraron que para la vegetación C3/C4 los resultados disminuyen en razón a la profundidad, inclinándose a C3 en el rango de 50 cm o menos. Para la C4 fueron inferiores a -20 ‰ entre 0 a 100 cm cuyos valores son C3. En la C3 la mayoría de datos se encuentran de 0 a 100 cm, los cuales pertenecen a carbono de plantas C3.
4. El análisis de los perfiles mostró diferencias entre los parámetros de estudio. Los Entisols mostraron bajos contenidos de carbono y stock, a excepción de (M11 y M14), además tienen un pH menos ácidos que los Inceptisols, registrándose al M08 el más alto pH con 6,79. Los Inceptisols presentaron una CIC de media a baja y variaciones de stock de carbono asociadas a la profundidad.
5. El análisis de componentes principales (ACP) evidenció asociaciones específicas entre variables, destacando la correlación positiva del $\delta^{13}C$ con el stock de carbono (M04) y con el COAM (M12 y M15), también la relación entre pH y profundidad (M13) y entre $\delta^{13}C$, Al y profundidad (M09), confirmando la interacción de las propiedades edáficas con la distribución y estabilidad del carbono en el suelo.
6. La correlación de Pearson evidenció que el COT presenta relaciones fuertes y positivas con el stock de C, el COP y, especialmente, con el COAM (0,9407), confirmándose que esta es capaz de sostener al COT en el suelo. Así mismo hay una correlación positiva alta entre Al y CIC (0,8198). El resto de las correlaciones observadas fueron bajas o negativas, reflejando relaciones más débiles o inversas entre las variables analizadas.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Profundizar en el estudio del fraccionamiento del carbono, ampliando el análisis de las fracciones orgánicas (COP y COAM) a diferentes tipos de suelos y sistemas de uso (agroforestales, agrícolas, pastizales y bosques), con el fin de establecer patrones regionales de almacenamiento de carbono.
2. Integrar el análisis isotópico ($\delta^{13}C$) con modelos de cambio de uso de la tierra que relacionen los cambios históricos de vegetación (C3 y C4) con los valores isotópicos del suelo para entender mejor la dinámica de carbono a largo plazo.
3. Realizar estudios multidisciplinarios, pensando en la integración de investigaciones socioeconómico y ecológico para entender cómo las prácticas agrícolas y el manejo de la tierra influyen en la estabilidad del carbono.
4. La investigación permitirá orientar a los agricultores en el uso y manejo adecuado de sus suelos según su capacidad real de almacenar carbono, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles que mejoren la fertilidad y productividad. Además, los resultados pueden servir como base para planes de manejo agroforestal, conservación del suelo y futuras iniciativas de pagos por servicios ambientales o proyectos de carbono en el Valle del Monzón.

VII. REFERENCIAS

- Al-Kaisi, M. M., Yin, X., y Licht, M. A. (2005). Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 105(4), 635-647. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.08.002>
- Alvarez, V.; Novais, R.; Dias, L. y Oliveira, J. (2017) Determinação e uso do fosforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 25, 7-32.
- Anderson, M., y Binnie, R. (1961). Modal Analysis of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 25(6), 499-503. <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500060025x>
- Azañero, L., Ñique, M. y Florida, N. (2020). Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, Perú. *TAYACAJA*, 3(1). <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.75>
- Balesdent, J., Mariotti, A., y Guillet, B. (1987). [PDF] *Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics*. *Biología y bioquímica del suelo*, 19(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90120-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90120-9)
- Barrales-Brito, E., Paz, F., Velázquez-Rodríguez, A., Hidalgo-Moreno, C. y Etchevers-Barra, J. (2022). Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en una secuencia de perturbación y sitios de referencia. *Terra Latinoamericana*, 40, 1 - 17. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1319>
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T., Neto, L., y Fernandes, S. (2000). Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54, 101-109. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00090-8)
- Bazán, T. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Universidad Nacional Agraria la Molina, Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima, Perú. http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf
- Bi, X., Chu, H., Fu, M., Xu, D., Zhao, W., Zhong, Y., Wang, M., Li, K., y Zhang, Y. (2023). Distribution characteristics of organic carbon (nitrogen) content, cation exchange capacity, and specific surface area in different soil particle sizes. *Scientific Reports*, 13, Article 12242. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38646-0>
- Burbano, H. (2016). El carbono orgánico del suelo en el ámbito de la naturaleza y la sociedad. *Suelos Ecuatoriales*, 46 (1-2), 89 – 100 . <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?Codigo=7831495>

- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 106 - 116. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H., y Rondón, M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 9(3), 222 - 235. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
- Cambardella, C. y Elliott, E. (1992). Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777 - 783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Cerri, C. C., Bernoux, M., Volkoff, B., y Moraes, J. (1996). Dinamica do carbono nos solos da Amazonia - A Amazônia e o desenvolvimento sustentado. In: congresso brasileiro de ciência do solo, 25, 1995, Viçosa. Anais. Viçosa: SBCS/UFV.
- Chiquito, M., Cándido, S., Feliciani, G., Vechetin, P., Pereira, T., Marques, J. y Albino, L. (2019). Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. *Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 136-145. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/vti-29269>
- Christensen, B. (1992). *Physical Fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates*. In: Stewart, B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. *Advances in Soil Science*, 20. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1
- Conrad, K., Dalal, R., Dalzell, S. Allen D., y Menzies, N. (2017). The sequestration and turnover of soil organic carbon in subtropical leucaena-grass pastures. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 248, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.020>
- Contreras, J. (2021). Efecto de la aplicación de enmiendas cálcicas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos ácidos en Satipo [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7685>
- Costa Junior, C., Piccolo, M. de C., Siqueira Neto, M., Camargo, P. B. de, Cerri, C. C., y Bernoux, M. (2011). Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1241–1252. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400017>

- Cotrufo, M. y Lavelle, J. M. (2022). Chapter One - Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy 172*, 1-66. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>
- Cotrufo, F., Wallenstein, M., Boot, C. M., Deneff, K, y Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *GlobalChangeBiology*, 19(4), 988-995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Cruz, W., Rodríguez, L., Salas, M., Hernández, V., Campos, R., Chávez, M., y Gordillo, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico sobre la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Dad, J. M. (2019). Organic carbon stocks in mountain grassland soils of northwestern Kashmir Himalaya: Spatial distribution and effects of altitude, plant diversity and land use. *Carbon Management*, 10(2), 149–162. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1568137>
- Dalal, C., y Mayer, J. (1986). Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Soil Research*, 24(2), 281-292. <https://doi.org/10.1071/sr9860281>
- Dai, Z.-C., Zhu, B., Wan, J. S. H., y Rutherford, S. (2022). Editorial: Global changes and plant invasions. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 845816. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.845816>
- Dalmolin, D., Gonçalves, C. N., Dick, D. P., Knicker, H., Klamt, E., y Kögel-Knabner, I. (2006). Organic matter characteristics and distribution in Ferralsol profiles of a climosequence in southern Brazil. *European Journal of Soil Science*, 57(5), 644-654. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00755.x>
- Desjardins, T., Turcq, B., Nguetkam, J.-P., Achoundong, G., Mandeng-Yogo, M., Cetin, F., y Lézine, A.-M. (2013). $\delta^{13}\text{C}$ variation of soil organic matter as an indicator of vegetation change during the Holocene in central Cameroon. *Comptes Rendus Géoscience*, 345(10–11), 539-552. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.06.001>
- Dimas, S. y Gnacadja, L. (2009). Cambio climático: la Comisión revela la importancia del suelo Informe de la conferencia. Bruselas 5 de marzo de 2009. Luxemburgo, Comisión Europea. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_09_353

- Doran, JW y Parkin, TB (1994). Definición y evaluación de la calidad del suelo. En: Doran, JW, Coleman, DC, Bezdicek, DF y Stewart, BA, Eds., Definición de la calidad del suelo para un medio ambiente sostenible. Sociedad de Ciencias del Suelo de América, Inc., Madison, 1-21. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Dortzbach, D., Gervasio, M., Novaes, L., y Paz, A. (2016). Horizontes diagnósticos superficiais de Cambissolos e uso de $\delta^{13}\text{C}$ como atributo complementar na classificação de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1339-1348. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900033>
- Dou, X., Wang, X., Jiang, Y., Xu, M., Li, Z., Huo, Z., y Zhang, W. (2016). Soil organic carbon dynamics under long-term fertilization in a black soil of China: Evidence from stable C isotopes. *Scientific Reports*, 6, 21488. <https://doi.org/10.1038/srep21488>
- Dubeux, J. C. B. Jr., Vendramini, J. M. B., Santos, M. V. F., da Silva, H. M. S., y de Carvalho, G. G. P. (2024). Carbon and nitrogen accumulation in roots of signal grass–forage peanut intercropped pastures at varying planting spacings. *Agronomy*, 14(12), 3023. <https://doi.org/10.3390/agronomy14123023>
- Duval, Matias Ezequiel, De Sa Pereira, Eduardo, Iglesias, Julio Osvaldo, y Galantini, Juan Alberto. (2014). Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico en un argiudol. *Ciencia del suelo*, 32(1), 105-115. Recuperado en 22 de julio de 2025, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100011&lng=es&tlng=es
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330804>
- Escobedo, R. (2010). *Suelos y capacidad de uso mayor de las tierras*. http://terra.iiap.gob.pe/assets/files/meso/09_zee_huanuco/05_Suelos_y_CUM.pdf.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Reviews in Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503-537.
- Food and Agriculture Organization (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institut national de recherche agronomique*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d8b7252e-03c2-4116-8b6c-ebd5ca3c9662/content>

- Galantini, J. y L. Suñer. (2008). *Las fracciones orgánicas del suelo: Análisis en los suelos de la Argentina*. <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/agrisc/v25n1/html/v25n1a06.htm>
- Gibbon, A., Silman, R., Malhi, Y., Fisher, J. B., Meir, P., Zimmermann, M., Dargie, G. C., Farfan, R. y Garcia, C. (2010). Ecosystem Carbon Storage Across the Grassland–Forest Transition in the High Andes of Manu National Park, Peru. *Ecosystems*, 13(7), 1097-1111. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9376-8>
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, D. y Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000700001
- Gregorich, E. G., Drury, C.F., Ellert, B.H. y Liang, B.C. (1996). Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 60, 472 – 476. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100020016x>
- Hassink, J., Whitmore, A. y Kubát, J. (1997). Fraccionamiento por tamaño y densidad de la materia orgánica del suelo y capacidad física de los suelos para proteger la materia orgánica. *Revista Europea de Agronomía*, 7, 189-199. DOI: 10.1016/S1161-0301(97)00045-2
- Hiernaux, P., Biélers, C. L., Valentin, C., Bationo, A., y Fernandez-Rivera, S. (1999). Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands. *Journal of Arid Environments*, 41(3), 231-245. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_53-54/010020956.pdf
- Hunter, B. D., Roering, J. J., Silva, L. C. R., y Moreland, K. C. (2024). Geomorphic controls on the abundance and persistence of soil organic carbon pools in erosional landscapes. *Nature Geoscience*, 17, 151-157. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01365-2>
- Ito, A. (2003). A global-scale simulation of the CO₂ exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere with a mechanistic model including stable carbon isotopes, 1953-1999. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 596-612. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16757>

- Kaboneka, S., Irakoze, W., Ndiokubwayo, S., Ntakiyiruta, P., y Niyungeko, C. (2024). Predicting soil Cation Exchange Capacity (CEC) from pH, percentage of clay and percentage of organic carbon: A case study on selected Burundi surface soils. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 10(6), 1–9. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2024.6.1>
- Kahle, M., Kleber, Torm, M. y Jahn, R. (2003). Carbon Storage in Coarse and Fine Clay Fractions of Illitic Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1732-1739. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1732>
- Kleber, M., Mertz, C., Zikeli, S., Knicker, H. y Jahn, R. (2004). Changes in surface reactivity and organic matter composition of clay subfractions with duration of fertilizer deprivation. *European Journal of Soil Science*, 55, 381-391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00610.x>
- Krüger, N., Finn, D. R., y Don, A. (2024). Soil depth gradients of organic carbon-13 – A review on drivers and processes. *Plant and Soil*, 495(1-2), 113-136. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06328-5>
- Laird, D.A., Martens, D.A. y Kingery, W.L., (2001). Nature of Clay-Humic Complexes in an Agricultural Soil. I. Chemical, Biochemical, and Spectroscopic Analyses. *Soil Science Societ of America Journal*. 5, 1413-1418. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551413x>
- Lal, R., (2009). La función de la materia orgánica del suelo en el ciclo global del carbono. En: Cambio Climático: ¿el suelo puede cambiar las cosas? Informe de la conferencia. Comisión Europea. http://ec.eurpea.eu/environmen/archives/soil/pdf/report_conference_es.pdf
- Larson W.E. y Pierce F.J., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F. ans Steward, B.A. (Eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication n° 35. SSSA and ASA, Madison, Wisconsin. 37-51. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19951904111>
- Lefevre, C., Rekik, F., Alcantara, V. y Wiese, L., (2017). [PDF] Suelo orgánico Carbono: el potencial oculto. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/i6937es/I6937ES.pdf>
- Layese, M., Clapp, c., Allmaras, R., Linden, D., Copeland, S., Molina, J. y Dowdy, R. (2002). Current and relic carbon using natural abundance carbon-13 1. *Soil Science*, 167(5), 315-326. <https://doi.org/10.1097/00010694-200205000-00002>

- Lok, S., Fraga, S., Noda, A. y García, M. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(1), 75-82. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193028545014.pdf>
- López, W., Reynoso, R., López, J., Villar, B., Camas, R., y García, J. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 897-910. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>
- Manzoni, S., y Cotrufo, M. F. (2024). *Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter – insights from modeling in phase space*. *Biogeosciences*, 21(18), 4077–4098. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077->
- Martínez, E., Fuentes, E, y Acevedo, H, (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Matus, Francisco J., y 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>
- Mehra, P. y Jackson, L. (1958). Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7(1), 317-327. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1958.0070122>
- Moreno, M., Peña, M., y Álvarez, R. (2017). Implementación del Método para la Determinación de Isótopos Estables de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en Carbones Mediante Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS). *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, 50, 20-26. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/download/21/8>
- Nanzer M. C., Ensinas S. C., Barbosa G. F., Barreta P. G. V., Oliveira T. P., Silva J. R. M., Paulino L. A. “Total organic carbon stock and granulometric fractioning of organic matter in soil use systems in Cerrado.” *Revista de Ciências Agroveterinárias*, vol. 18(1), 2019, p. 136-145
- Nelson, W. y Sommers, L. (1982). Total carbon, organic, and organic matter. In: Page, L., Miller, H., Keeney, R. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: *American Society of Agronomy*, 2, 539-579. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>

- Olsen, S., Cole, C. y Watanabe, F. (1954). Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA Circular Nro 939, US Government Printing Office, Washington DC.
<https://ia803207.us.archive.org/21/items/estimationofavai939olse/estimationofavai939olse.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports. FAO.
<https://www.fao.org/3/i6937es/I6937ES.pdf>
- Ouyang, N., Zhang, P., Zhang, Y., Sheng, H., Zhou, Q., Huang, Y., y Yu, Z. (2023). Cation Exchange Properties of Subsurface Soil in Mid-Subtropical China: Variations, Correlation with Soil-Forming Factors, and Prediction. *Agronomy*, 13(3), 741.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13030741>
- Panagea, I.S., Apostolakis, A., Berti, A., Bussell, J., Čermák, P., Diels, J., Elsen, A., Kusá, H., Piccoli, I., Poesen, J., Stoate, C., Tits, M., Tóth, Z. y Wyseure, G. (2022). Impact of agricultural management on soil aggregates and associated organic carbon fractions: analysis of long-term experiments in Europe. *SOIL*, 8, 621–644.
<https://doi.org/10.5194/soil-8-621-2022>
- Paz, Fernando, y Etchevers, Jorge. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355. Recuperado en 22 de julio de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300339&lng=es&tlng=es.
- Porta, J., Lopez-acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología para Agricultura y el Medio Ambiente*. (3^{era}ed)Ediciones/Mundi-prensa/España.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.pdf?sequence>
- Post, W., Izaurralde, R., Mann, L., Bliss, N. (2001). Monitoreo y verificación de cambio de carbono orgánico en el suelo. *Cambio Climático*, 51, 73-99.
<https://doi.org/10.1023/A:1017514802028>
- Raij, B., Cantarella, H., Quaggio, J., Furlani, A. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas,Brasil. Instituto Agronômico/Fundação IAC, 285p. (Boletim Técnico 100)

- Razanamahandry, V., Dewaele, M., Govers, G., Brosens, L., Campforts, B., Jacobs, L., Razafimbelo, T., Rafolisy, T., y Bouillon, S. (2022). Stable isotope profiles of soil organic carbon in forested and grassland landscapes in the Lake Alaotra basin (Madagascar): insights in past vegetation changes. *Biogeosciences*, 19, 3825-3841. DOI: 10.5194/bg-2021-336
- Rowley, M. C., Grand, S. y Verrecchia, É. P. (2018). Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 137(1), 27-49. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>
- Saiz, G., Bird, M. I., Wurster, C., Quesada, C. A., Ascough, P., Domingues, T., Schrod, F., Schwarz, M., Feldpausch, T. R., Veenendaal, E., Djagbletey, G., Jacobsen, G., Hien, F., Compaoré, H., Diallo, A., y Lloyd, J. (2015). The influence of C₃ and C₄ vegetation on soil organic matter dynamics in contrasting semi-natural tropical ecosystems. *Biogeosciences*, 12(16), 5041-5059. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5041-2015>
- Salazar, D., y Silva, V. (2017). Isotopos en la prehistoria y arqueologías valencianas. *SAGVNTVM-EXTRA*, 19, 75-91
- Sardón Nina, S., Zapata Hernández, R. D., y Arias López, L. A. (2021). Comparison of organic carbon from humic and fulvic acids and the degree of humification in five soil orders. *Peruvian Journal of Agronomy*, 5(1), 25-34. <http://dx.doi.org/10.21704/pja.v5i1.1676>
- Scheel, T., Dörfler, C. y Kalbitz, K. (2007). La precipitación de materia orgánica disuelta por aluminio estabiliza el carbono en suelos forestales ácidos. *Soil Science Society of America Journal*. 71, 64-74. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0111>
- Schiebelbein, E., Bordonal, R. de O., Cerri, C., Oliveira, M. da S., y Cherubin, R. (2023). Mineral-associated and particulate organic matter in aggregates as a proxy for soil C changes in pasturesugarcane land use transitions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47, 1-19. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220103>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. y Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sousa, D. (2017). Distribuição vertical de carbono orgânico particulado em Neossolo sob floresta alta de restinga de mata Atlântica [Tesis de pregrado, Universidade Federal da Paraíba]. Repositorio Institucional UFPB. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/4343>

- Steiner, F., Pivetta, L. A., Castoldi, G., Costa, M. S. S. M., y Costa, L. A. M. (2011). Carbono orgánico e carbono residual do solo em sistema de plantio direto, submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 6(3), 401-408. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i3a944>
- Tonucci, R. (2010). Sequestro e discriminação isotópica de carbono em sistemas agrossilvipastoris [Tesis de posgrado, Universidade Federal de Vicosa]. Repositorio Institucional UFV. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/1751>
- Vargas, Benedicto., Amezcua, Mayra., López, J., Cueto, A., Cruz, F., Nájera, J., y Aguirre, C. (2023). Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Ciencias Botánicas*, 101 (1), 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>
- Verhulst, N., Fran, I. y Govaerts, B. (2015). Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo, Apdo. Postal 6-641. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/4409/56986.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Videla, C. y Trivelin, O. (2008). Influencia del método de dispersión del suelo en la calidad de materia orgánica separada por fraccionamiento granulométrico. *Ciencia del suelo*, 26(1), 97-103. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672008000100011&lng=es&tlng=es.
- Volke, T., Velasco, J. y Rosa, D. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación (1). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México. <https://www.worldcat.org/es/title/suelos-contaminados-por-metales-y-metaloides-muestreo-y-alternativas-para-su-remediacion/oclc/99997022>
- Walkley, A. y Black, I. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. In *Soil science*. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-000>.
- Wander, M. (2004). *Soil organic matter fractions and their relevance to soil function*: In: K Magdoff y RR Weil(eds) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780203496374.ch3>
- Watson, T., Noble, R., Bolin, B., Ravindranath, H., Verardo, J. y Dokken, J. (2000). *Land use, land-use change and forestry: a special report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/land-use-land-use-change-and-forestry>

- Wattel-Koekkoek, EJW, Buurman, P., Van der Pflicht, J., Wattel, E. y Van Breemen, N. (2003). Mean Residence Time of Soil Organic Matter Associated with Kaolinite and Smectite. *European Journal of Soil Science*, 54, 269-278. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00512.x>
- Werth, N., y Kuzyakov, S. (2023). Soil depth gradients of organic carbon-13 – A review on drivers and processes. *Plant and Soil*, 495(1-2), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06328-5>
- Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M. y Kögel-Knabner, I. (2012). Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*, 18(7), 2233-2245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02699.x>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J. y Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Yang, S., Zhang, S., Yuan, M., Shi, Z., Zhang, M., Sun, L., Gao, J., y Wang, X. (2022). The variations of leaf $\delta^{13}C$ and its response to environmental changes of arbuscular and ectomycorrhizal plants depend on life forms. *Plants*, 11(23), 3236. <https://doi.org/10.3390/plants11233236>
- Yeomans, C. y Bremner, M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467-1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809>
- Zamora-Morales, Bertha P., Mendoza-Cariño, Mayra, Sangerman-Jarquín, Dora Ma., Quevedo Nolasco, Abel, y Navarro Bravo, Agustín. (2018). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(8), 1787-1799. Epub 06 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>
- Zavala, J., Mansilla, L., Zavala, S, y Merino, E. (2019). Mitigación del cambio climático a través del secuestro y almacenamiento del carbono y evaluación de los servicios ambientales del SAF caucho o jebe (*Hevea brasiliensis*) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tingo María. *Anales Científicos*, 80(2) <https://doi.org/10.21704/ac.v80i2.1478>

ANEXOS

Tabla 13. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Inceptisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	Cultivo
M02/706	Inceptisol	Ap	10YR 3/4	0 - 20 cm	Hierbas
		A2	10YR 2/2	20 - 33 cm	
		AB	10YR 2/2	33 - 50 cm	
		Bw	10YR 6/8	50 - 90 cm	
		BC	10YR 6/8	90 - 140 cm	
		C	7.5YR 5/8	140 - 175 cm	
M04/750	Inceptisol	Ap	5Y 3/4	0 - 5 cm	Coca
		Bw1	5Y 4/4	5 - 20 cm	
		Bw2	5Y 4/4	20 - 40 cm	
		Bw3	5Y 4/4	40 - 60 cm	
		Bw4	5Y 4/4	60 - 110 cm	
		Bw5	5Y 4/4	110 - 125 cm	
		BC	5Y 4/4	125 a +	
M05/732	Inceptisol	A	7.5YR 2.5/3	0 - 5 cm	Coca
		Bw1	7.5YR 3/4	5 - 20 cm	
		Bw2	7.5YR 4/4	20 - 40 cm	
		BC	7.5YR 3/4	40 - 60 cm	
		C	5YR 3/3	60 - 110 cm	
M06/707	Inceptisol	A	7.5YR 2.5/2	0 - 20 cm	Cacao
		Bw1	7.5YR 4/4	20 - 30 cm	
		2C1	7.5YR 4/6	30 - 45 cm	
		3C2	7.5YR 4/6	45 - 70 cm	
		4Cg	7.5YR 5/6	70 - 90 cm	
		5Cg	7.5YR 5/6	90 a +	
M09/740	Inceptisol	Ap	10Y 3/4	0 - 20 cm	Cacao
		Bw	10Y 6/8	20 - 40 cm	
		C	10Y 6/8	40 a +	
M10/769	Inceptisol	A	7.5YR 4/4	0 - 10 cm	Coca
		Bw1	5YR 5/6	10 - 40 cm	
		Bw2	5YR 5/8	40 - 70 cm	
		BC	5YR 5/8	70 a +	

Tabla 14. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Inceptisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	Cultivo
M12/734	Inceptisols	A	10YR 5/4	0 - 15 cm	Pastos
		Bw1	10YR 7/6	15 - 30 cm	
		Bw2	10YR 7/4	30 - 50 cm	
		Bw3	10YR 7/6	50 - 70 cm	
		Bw4	10YR 6/4	70 - 100 cm	
		BC	10YR 7/2	100 - 120 cm	
M13/720	Inceptisols	A	5YR 4/6	0 - 8 cm	Purma secundaria
		Bw1	5YR 5/8	8 - 20 cm	
		Bw2	5YR 5/8	20 - 40 cm	
		Bw3	5YR 5/8	40 - 60 cm	
		BC	5YR 5/8	60 - 90 cm	
		C	5YR 5/8	90 a +	
M15/975	Inceptisols	A	10YR 3/4	0 - 25 cm	Purma secundaria
		Bw1	10YR 3/6	25 - 40 cm	
		Bw2	10YR 3/6	40 - 55 cm	
		Bw3	7.5YR 5/8	55 - 80 cm	
		Bw4	7.5YR 5/8	80 - 110 cm	
		BC	7.5YR 5/8	110 a +	
M07/734	Inceptisols	A	5YR 3/3	0 - 12 cm	Purma baja
		Bw	5YR 3/4	12 - 25 cm	
		Bw ₂	2.5YR 2.5/4	25 - 38 cm	
		BC	2.5YR 4/6	38 - 60 cm	
		C	2.5YR 3/6	60 - 110 cm	

Tabla 15. Altitud, horizontes, color, profundidad y cultivo predominante de los perfiles estudiados del orden Entisols

Perfil/ Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	Cultivo
M01/675	Entisol	Ap	5Y 2.5/2	0 - 10 cm	Yuca
		C1	5Y 3/2	10 - 18 cm	
		2C	5Y 3/2	18 - 25 cm	
		3C	5Y 2.5/2	25 - 30 cm	
		4C	5Y 3/2	30 - 40 cm	
		5C	5Y 4/2	40 - 60 cm	
M03/698	Entisol	Ap	7.5YR 2.5/3	0 - 13 cm	Cacao
		AC	7.5YR 3/3	13 - 30 cm	
		C ₁	5Y 4/2	30 - 58 cm	
		C ₂	5Y 3/2	58 - 68 cm	
		2C	5Y 4/3	68 - 80 cm	
M08/718	Entisol	Ap	5Y 4/2	0 - 8 cm	Maíz
		C ₁	5Y 3/2	8 - 16 cm	
		C ₂	5Y 4/2	16 - 30 cm	
		2C	5Y 4/1	30 - 55 cm	
		2C ₂	5Y 5/1	55 - 80 cm	
		3C	5Y 3/2	80 - 100 cm	
M11/753	Entisol	A	10YR 3/3	0 - 20 cm	Yuca
		C1	10YR 5/4	20 - 40 cm	
		C2	2.5Y 5/4	40 - 70 cm	
		2C	5Y 2.5/1	70 a +	
M14/765	Entisol	A	10YR 3/3	0 - 35 cm	Cacao
		C1	10YR 3/6	35 - 60 cm	
		C2	10YR 4/6	60 - 80 cm	
		C3	10YR 5/6	80 - 100 cm	
		C4	10YR 5/6	100 - 110 cm	
		C5	10YR 5/6	110 a +	

Tabla 16. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrogeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols

	Clase textural	DAP	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	CIC	MO	N
M2 - 1	Franco	1,33	4,5	8,35	2,5	0,21	0,15	0,04	8,3	7,5	11,2	5,58	0,25
M2 - 2	Franco	1,34	4,8	6,5	2,3	0,18	0,16	0,07	8,5	8,1	11,21	5,31	0,24
M2 - 3	Franco	1,32	4,7	4,8	2,1	0,15	0,12	0,02	7,9	7,3	10,29	6,62	0,3
M2 - 4	Franco arcilloso	1,23	4,6	2,3	2,1	0,12	0,13	0,06	10,1	9,2	12,51	1,48	0,07
M2 - 5	Arcilloso	1,02	4,6	1,1	2	0,12	0,09	0,09	9,3	8,6	11,6	1,2	0,05
M2 - 6	Arcilloso	1,01	4,6	0,9	1,8	0,09	0,05	0,03	8,1	7,1	10,07	0,5	0,02
M4 - 1	Franco arcilloso	1,22	4,4	12,5	2,3	0,12	0,15	0,02	7,3	6,8	9,89	1,58	0,07
M4 - 2	Arcilloso	1,02	4,6	2,3	3,5	0,15	0,17	0,03	5,3	4,8	9,15	0,74	0,03
M4 - 3	Arcilloso	1,01	4,4	3,1	1,7	0,11	0,14	0,01	5,1	4,7	7,06	0,72	0,03
M4 - 4	Arcilloso	1,05	4,3	1,7	1,1	0,14	0,13	0,02	4,1	3,7	5,49	0,69	0,03
M4 - 5	Arcilloso	1,1	4,8	1,2	2,3	0,12	0,15	0,02	4,2	3,7	6,79	0,22	0,01
M4 - 6	Arcilloso	1,07	4,8	1,4	1,1	0,14	0,12	0,03	4,3	3,9	5,69	0	0
M4 - 7	Arcilloso	1,12	4,9	1,2	1,5	0,1	0,1	0,02	4,8	3,6	6,42	0	0
M5 - 1	Franco limoso	1,35	4,7	16	3,5	0,33	0,18	0,04	4,1	3,5	8,15	2,6	0,12
M5 - 2	Franco arcilloso	1,21	4,3	11	3,82	0,28	0,19	0,07	4,73	4,2	9,09	1,4	0,06
M5 - 3	Franco arcilloso	1,23	4,4	5	3,5	0,22	0,21	0,06	4,2	3,6	8,19	1,3	0,06
M5 - 4	Arcilloso	1,02	4,4	4,2	3,3	0,2	0,16	0,05	4,61	4,1	8,32	1,25	0,06
M5 - 5	Arcilloso	1,03	4,8	3,5	4,1	0,21	0,12	0,02	4,1	3,3	8,55	1,12	0,05
M6 - 1	Franco limoso	1,35	5,2	12	4,5	0,5	0,21	0,02	5,2	3,8	10,43	2,2	0,1
M6 - 2	Franco arcilloso	1,24	4,6	6,5	4,1	0,34	0,2	0,06	5,3	4,2	10	1,8	0,08
M6 - 3	Arcilloso	1,02	4,6	5,8	3,8	0,28	0,18	0,04	5,5	4,5	9,8	1,1	0,05
M6 - 4	Arcilloso	1,03	4,6	5,1	3,9	0,24	0,17	0,01	5,5	5,2	9,82	1	0,05
M6 - 5	Arcilloso	1,04	5,1	4,8	4,1	0,18	0,18	0,03	4,6	3,5	9,09	0,95	0,04
M6 - 6	Arcilloso	1,05	4,7	4,6	4,2	0,17	0,16	0,02	6,7	6,3	11,25	0,8	0,04

Tabla 17. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrogeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols

	Clase textural	DAP	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	CIC	MO	N
M9 -1	Franco arcilloso	1,23	4,7	7	2,85	0,25	0,18	0,03	4,2	3,2	7,51	3,21	0,14
M9 -2	Arcilloso	1,02	4,8	4,5	2,91	0,21	0,2	0,06	3,8	2,9	7,18	1,5	0,07
M9 -3	Arcilloso	1	4,7	3,7	2,7	0,19	0,19	0,04	4	3,5	7,12	1,21	0,06
M10 - 1	Franco arcilloso	1,22	3,6	13,4	2,58	0,23	0,21	0,11	2,57	2,22	5,7	2,57	0,12
M10 - 2	Arcilloso	1,05	3,7	11,2	2,51	0,21	0,19	0,06	2,48	2,15	5,45	1,74	0,08
M10 - 3	Arcilloso	1,07	3,8	6,5	2,44	0,25	0,2	0,08	2,35	1,85	5,32	1,2	0,05
M10 - 4	Franco arcilloso limoso	1,31	4	4,3	2,65	0,27	0,17	0,06	2,31	1,2	5,46	1,11	0,05
M12 - 1	Franco arcilloso	1,25	4,3	7,09	2,42	0,25	0,19	0,09	3,03	2,33	5,98	2,55	0,11
M12 - 2	Arcilloso	1,08	4,2	5,82	2,31	0,21	0,12	0,03	2,98	2,41	5,66	1,81	0,08
M12 - 3	Arcilloso Limoso	1,31	4,9	3,51	2,87	0,27	0,11	0,04	2,5	1,39	5,8	1,35	0,06
M12 - 4	Arcilloso Limoso	1,33	4,7	6,23	2,54	0,29	0,12	0,04	2,46	0,89	5,45	1,12	0,05
M12 - 5	Arcilloso Limoso	1,35	4,8	4,22	2,55	0,26	0,09	0,05	2,38	0,88	5,33	1,1	0,05
M12 - 6	Arcilloso arenoso	1,36	4,8	3,66	2,61	0,2	0,1	0,05	2,71	0,78	5,67	1	0,05
M13 - 1	Franco arcilloso	1,21	4,5	2,52	1,2	0,21	0,19	0,03	3,57	3,21	5,2	1,55	0,07
M13 - 2	Arcilloso	1,13	4,4	1,93	1	0,18	0,15	0,03	3,22	2,72	4,58	1,28	0,06
M13 - 3	Arcilloso	1,11	4,6	1,85	0,9	0,17	0,14	0,03	3,11	2,35	4,35	1,32	0,06
M13 - 4	Arcilloso	1,12	5	1,74	0,92	0,15	0,11	0,05	2,98	2,22	4,21	1,12	0,05
M13 - 5	Arcilloso	1,13	4,9	1,7	0,8	0,12	0,09	0,07	2,54	1,98	3,62	1,08	0,05
M13 - 6	Arcilloso	1,07	4,8	1,68	0,81	0,11	0,08	0,03	2,13	1,93	3,16	1	0,05
M15 - 1	Franco	1,31	4,9	5,6	3,1	0,28	0,1	0,03	8,12	7,23	11,64	5,21	0,23
M15 - 2	Franco arcilloso	1,23	4,2	1,3	2,2	0,12	0,09	0,04	12,1	11,1	14,55	3,37	0,15
M15 - 3	Franco arcilloso	1,21	4,5	1,4	2,3	0,15	0,1	0,05	9,25	8,09	11,85	2,26	0,1
M15 - 4	Arcilloso	1,1	4,3	0,9	1,2	0,1	0,06	0,03	8,75	7,11	10,15	1,82	0,08
M15 - 5	Arcilloso	1,09	4,7	1	1,3	0,11	0,05	0,04	8,62	7	10,11	1,56	0,07
M15 - 6	Arcilloso	1	4,8	0,5	1,1	0,09	0,05	0,05	8,41	6,78	9,7	1,32	0,06

Tabla 18. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrogeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Entisols

	Clase textural	DAP	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	CIC	MO	N
M1 - 1	Limoso	1,35	6,1	3,2	6,2	0,32	0,19	0,08	1,1	0,5	7,89	1,1	0,05
M1 - 2	Franco arenoso	1,68	6	2,5	5,6	0,28	0,21	0,04	0,8	0,3	6,93	0,5	0,02
M1 - 3	Limoso arcilloso	1,28	6	1,7	6,1	0,22	0,18	0,05	0,2	0,1	6,75	0,3	0,01
M1 - 4	Franco limoso	1,38	5,4	1	5,3	0,25	0,22	0,05	0,21	0,09	6,03	0,4	0,02
M1 - 5	Franco arenoso	1,52	5,8	0,8	6	0,21	0,12	0,06	0,14	0,1	6,53	0,1	0
M1 - 6	Franco arenoso	1,69	6,6	0,2	6,4	0,24	0,08	0,01	0,12	0,1	6,85	0,1	0
M3 - 1	Franco limoso	1,25	4,8	11	5,2	0,61	0,22	0,08	1,4	1,3	7,51	1,45	0,07
M3 - 2	Franco limoso	1,22	4,8	9,3	4,8	0,32	0,19	0,09	1,65	1,56	7,05	1,1	0,05
M3 - 3	Arenoso	1,72	4,8	5,6	5	0,25	0,21	0,03	1,5	1	6,99	0,6	0,03
M3 - 4	Arenoso	1,61	5,5	4,2	5,2	0,31	0,18	0,03	1,1	0,98	6,82	0,5	0,02
M3 - 5	Arcilloso	1,02	5,6	4	5,3	0,28	0,19	0,02	1,3	0,87	7,09	0,2	0,01
M8 - 1	Franco limoso	1,35	6,3	5,6	6,2	0,5	0,21	0,09	0,00	0	7	1,2	0,05
M8 - 2	Franco arenoso	1,46	6,5	1,3	5,8	0,3	0,15	0,1	0,00	0	6,35	0,7	0,03
M8 - 3	Franco limoso	1,34	6,8	4,4	5,5	0,4	0,17	0,08	0,00	0	6,15	0,5	0,02
M8 - 4	Franco limoso	1,36	5,9	4,5	5,6	0,2	0,31	0,09	0,10	0,06	6,30	0,6	0,03
M8 - 5	Franco arenoso	1,48	5,9	1,1	5,3	0,3	0,18	0,08	0,09	0,04	5,95	0,4	0,02
M8 - 6	Franco arenoso	1,59	6,2	0,9	5,6	0,2	0,16	0,04	0,07	0,04	5,87	0,4	0,02

Tabla 19. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrogeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Entisols

	Clase textural	DAP	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	CIC	MO	N
M11 - 1	Franco limoso	1,35	4,9	6,32	3,54	0,32	0,18	0,03	1,63	0,9	5,7	1,1	0,05
M11 - 2	Franco arenoso	1,65	5,1	4,99	4,09	0,28	0,18	0,04	0,91	0,42	5,51	0,52	0,02
M11 - 3	Franco arenoso	1,66	5,2	6,22	4,12	0,29	0,17	0,03	0,89	0,38	5,5	0,48	0,02
M11 - 4	Arenoso	1,72	4,8	1,44	3,36	0,19	0,09	0,06	1,35	0,92	5,05	0,35	0,02
M14 - 1	Franco arenoso	1,45	5,6	9	6,3	0,4	0,21	0,04	0,5	0	7,45	3,02	0,14
M14 - 2	Franco arenoso	1,65	4,9	8..24	5,81	0,38	0,18	0,03	0,8	0	7,2	1,93	0,09
M14 - 3	Arcilloso arenoso	1,37	4,7	3,5	3,84	0,35	0,17	0,04	0,94	0,18	5,34	2,13	0,1
M14 - 4	Arcilloso arenoso	1,35	4,6	3,4	3,75	0,27	0,15	0,05	0,98	0,38	5,19	1,74	0,08
M14 - 5	Arcilloso arenoso	1,38	4,6	4,4	3,67	0,22	0,13	0,05	1	0	5,07	2,13	0,1
M14 - 6	Arcilloso arenoso	1,36	4,4	2,9	3,52	0,2	0,1	0,04	1,13	0,22	4,99	2,24	0,1

Tabla 20. Clase textural, densidad aparente, pH, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrogeno más aluminio, aluminio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y nitrógeno de los horizontes estudiados del orden Inceptisols

	Clase textural	DAP	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	CIC	MO	N
M7 - 1	Franco arcilloso	1,21	5,9	12	4,8	0,35	0,18	0,05	2,8	2,3	8,18	2,3	0,1
M7 - 2	Franco arcilloso	1,23	5,7	10	4,74	0,33	0,19	0,04	2,6	2,2	7,9	1,5	0,07
M7 - 3	Arcilloso	1,02	5,5	8,3	4,7	0,34	0,16	0,02	2,85	2,5	8,07	1,3	0,06
M7 - 4	Arcilloso	1,03	5,7	7,5	4,72	0,31	0,15	0,02	2,52	2,1	7,72	1,1	0,05
M7 - 5	Arcilloso	1,04	5,5	6,4	4,44	0,29	0,12	0,02	2,1	1,5	6,97	1	0,05



Figura 9. Muestras de suelo pesadas y codificadas



Figura 10. Muestras en el agitador horizontal



Figura 11. Muestras en crisol de porcelana y dentro de la estufa



Figura 12. Muestras molidas en la piedra ágata



Figura 13. Muestras dentro de microtubo Eppendorf



Figura 14. Muestras en el laboratorio de isótopos estables ya establecidas para el análisis isotópico



Figura 15. Micro Balanza Mettler Toledo XP6



Figura 16. Muestra de suelo dentro de la micro balanza y las capsulas de estaño utilizadas



Figura 17. Patrones estándar para la calibración del equipamiento de análisis isotópico (patrón de trabajo isotópico de urea C-13, N-15-5g y ciclohexanona)



Figura 18. Evaluación de datos



Figura 19. Proceso de pesado de las muestras de suelo en Brasil



Figura 20. Evidencia fotográfica



Figura 21. Recolección de muestras



Figura 22. Explicación de calicata



Figura 23. Equipo de trabajo