



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

Facultad de Ciencias y Tecnología

Escuela de Ingeniería Ambiental

Impacto del cambio de uso de suelo sobre la existencia de carbono en la
microcuenca de Zhucay (Azuay, Ecuador)

Diego Fabian Aranda Tigre

Alex Giovanni Cuji Maldonado

Director: Dr. Gustavo Chacón, Ph.D.

Cuenca – Ecuador

2026

DEDICATORIA

A mis padres, les dedico esta tesis como una muestra de amor por la confianza, apoyo incondicional, darme todo lo necesario y los sacrificios puestos en mi para ayudarme en mi formación académica, han sido un pilar fundamental para lograr alcanzar mis metas y sueños que me he propuesto.

A mis hermanas y hermano por estar apoyándome durante todo esta etapa de mi vida y al resto de mi familia quienes no dejaron de confiar en mí.

Y como último a mí mismo, por los momentos donde la duda, el miedo quisieron más, donde las sonrisas y victorias fueron momentos para recordar y por haberlo logrado a pesar de todo.

Diego Aranda

DEDICATORIA

Con profundo agradecimiento y emoción, dedico este trabajo en primer lugar a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios, consejos y apoyo constante, por enseñarme el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. Cada logro alcanzado es también fruto de todo lo que han hecho por mí, de las veces que me alentaron a seguir adelante aun en los momentos difíciles y de la confianza que siempre depositaron en mis capacidades.

A mi hermano, por su compañía, comprensión y apoyo durante este proceso académico.

Gracias por estar presente en los momentos importantes, por motivarme y por brindarme fortaleza para continuar cumpliendo cada meta propuesta.

A mis amigos y amistades, quienes hicieron de este camino una experiencia más llevadera y significativa. Gracias por compartir momentos de alegría, aprendizaje y apoyo incondicional, por las palabras de ánimo en los momentos complicados y por cada experiencia vivida durante esta etapa universitaria. La amistad y el compañerismo fueron parte importante para poder culminar este logro.

De manera muy especial, dedico también este trabajo a Lowell Mineral Exploration Ecuador S.A., por el valioso apoyo brindado a través de la beca otorgada, la cual representó una gran oportunidad para continuar y culminar mis estudios. Su aporte no solo contribuyó a mi formación académica y profesional, sino que también me motivó a seguir esforzándome para alcanzar mis objetivos y crecer tanto personal como profesionalmente.

Finalmente, dedico este logro a todas aquellas personas que de una u otra manera estuvieron presentes durante mi formación, brindándome apoyo, confianza y motivación para no rendirme y seguir adelante hasta alcanzar esta importante meta académica.

Alex Cuji

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a nuestros padres y familia por el apoyo brindado dentro de nuestra etapa universitaria.

A nuestros compañeros de clases, con los cuales compartimos esta travesía y siempre nos mantuvimos unidos.

A los docentes, que aparte de su rol de educador, nos brindaron sus experiencias y no dudaron en resolver cualquier duda que hubiésemos tenido. En especial a nuestro director al Dr. gustavo Chacón por su paciencia y apoyo, por darnos las herramientas necesarias y guiarnos en todo momento.

De igual manera a la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería Ambiental por la formación académica que nos dio para poder realizar este trabajo.

Diego Aranda y Alex Cuji

Tabla de contenido

RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	2
2.1. Área de estudio	2
2.2. Diseño de muestreo	3
2.3. Análisis de laboratorio	3
2.3.1. Determinación de la densidad aparente (DA).....	3
2.3.2. Determinación de la textura del suelo	3
2.3.3. Determinación del pH del suelo	4
2.3.4. Determinación de la humedad gravimétrica post-drenaje (HGPD).....	4
2.3.5. Determinación del contenido de materia orgánica del suelo (% MOS) y existencia del carbono orgánico del suelo (COS).....	4
2.4. Análisis estadístico	5
3. RESULTADOS	5
3.1. Propiedades edáficas generales	5
3.2. Textura del suelo.....	6
3.3. Existencias de carbono orgánico del suelo (COS)	7
3.4. Análisis estadístico	8
4. DISCUSIÓN.....	14
5. CONCLUSIONES.....	17
6. REFERENCIAS BBLIOGRÁFICAS.....	18
7. ANEXOS	20

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Mapa de la zona y ubicación de los puntos de muestreo.....	2
Ilustración 2. Panel de boxplots del ANOVA bifactorial: propiedades edáficas por uso de suelo y profundidad. Fuente: Elaboración propia (2026).	9
Ilustración 3. Contribución porcentual de las variables edáficas a los componentes principales CP1 y CP2 Fuente: Elaboración propia (2026).	12
Ilustración 4. Biplot del ACP por zona altitudinal. Las elipses de confianza muestran separación clara entre zona alta (azul) y zona baja (naranja). Fuente: Elaboración propia (2026).	13
Ilustración 5. Biplot del ACP por profundidad. Fuente: Elaboración propia (2026).	14

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades edáficas por uso de suelo y profundidad en la microcuenca de Zhucay.	6
Tabla 2 Composición textural (%) por uso de suelo y profundidad.	7
Tabla 3. Promedios de textura del suelo (arena, limo y arcilla%) por uso de suelo o zona de estudio	7
Tabla 4 Existencias de carbono orgánico del suelo (COS, t C ha ⁻¹) estimadas con dos factores de conversión (f = 0.58 y f = 0.724) por profundidad y uso de suelo.	8
Tabla 5. Resultados del ANOVA bifactorial (Tipo II) para las propiedades edáficas en la microcuenca de Zhucay. Factor A: uso de suelo (6 niveles); Factor B: profundidad (2 niveles); n = 20 corresponde al número de unidades de análisis (10 sitios × 2 profundidad).....	10
Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ).	11
Tabla 7. Localización y características de las áreas estudiadas	20

Impacto del cambio de uso de suelo sobre las existencias de carbono orgánico del suelo en la microcuenca de Zhucay (Azuay, Ecuador)

Impact of land use change on soil organic carbon stocks in the Zhucay microwatershed (Azuay, Ecuador)

Diego Fabian Aranda Tigre · Alex Giovanni Cuji Maldonado

Director: Dr. Gustavo Chacón, Ph.D.

Universidad del Azuay — Cuenca, Ecuador, 2026

RESUMEN

Se evaluaron las reservas de carbono orgánico del suelo en diez usos de suelo de la microcuenca Zhucay, Azuay, a dos profundidades y en dos rangos de altitud. Se determinó la densidad aparente, la materia orgánica, la humedad gravimétrica después del drenaje y el pH, y juntamos análisis univariados y multivariados. El ANOVA no encontró significancia acerca del uso actual del suelo, sin embargo, el análisis de componentes principales explicó el 83 % de la variabilidad total y separó claramente las zonas altas de las zonas bajas. Los principales resultados muestran que la altitud y la calidad física del suelo organizan las reservas de carbono con más fuerza y son los factores que estructuran las reservas de carbono.

Palabras clave: Carbono orgánico del suelo, Cambio de uso del suelo, Gradiente altitudinal, Análisis multivariado, Ecosistemas altoandinos

ABSTRACT

Soil organic carbon stocks were evaluated across ten land uses in the Zhucay micro-watershed, Azuay, at two depths and two altitude ranges. Bulk density, soil organic matter, post-drainage gravimetric water content, and pH were determined, and univariate and multivariate analyses were combined. ANOVA found no significant effect of current land use; however, principal component analysis explained 83% of total variability and clearly separated high-altitude zones from low-altitude zones. The main results show that altitude and soil physical quality organize carbon stocks more strongly and are the factors that structure carbon reserves.

Keywords: soil organic carbon, land use change, altitudinal gradient, multivariate analysis, high-Andean ecosystems

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes más activos dentro de los ecosistemas terrestres son los suelos, participa en procesos como el ciclo de nutrientes, la regulación hídrica y almacenamiento de carbono. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los suelos constituyen el principal reservorio de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres, almacenando aproximadamente 1500 Gigatoneladas de carbono en el primer metro de profundidad, cifra que duplica el contenido en la atmósfera y triplica el almacenado en la biomasa vegetal (FAO, 2021).

La capacidad de los suelos para almacenar carbono los convierten como actores claves en el equilibrio del balance global. Por eso pequeños cambios en el uso de suelo puede generar impactos significativos en el equilibrio global de carbono y en los procesos asociados al cambio climático (Rodrigues et al., 2023). Se estima que el cambio de uso de suelo contribuye en un 13% de las emisiones antropogénicas de CO₂ a nivel mundial, asociada principalmente a la conversión de ecosistemas naturales en sistemas productivos (IPCC, 2022).

En Ecuador la transformación de estos ecosistemas naturales hacia sistemas agrícolas, pastizales o plantaciones forestales representan una dinámica creciente dentro del territorio (MAATE, 2023), estos cambios pueden alterar significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, afectando la acumulación, estabilización y descomposición de la materia orgánica (Calderón et al., 2025). Estos cambios pueden modificar las reservas de carbono del suelo debido a variaciones en los aportes de biomasa, la actividad microbiana y las condiciones ambientales del suelo (Mondragón et al., 2025).

Frente a este panorama, la presente investigación se propuso evaluar cómo el cambio de uso del suelo afecta la existencia de carbono orgánico del suelo (COS) a dos altitudes. Para ello, se compararon diferentes usos del suelo representativos y se analizaron propiedades edáficas relacionadas con el almacenamiento de carbono en distintas profundidades del perfil del suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La microcuenca de Zhucay, ubicada en la zona alta del cantón Cuenca, forma parte del sistema hidrológico del Macizo del Cajas, caracterizado por un predominio de ecosistemas de páramo y bosque montano alto. Situada generalmente entre 2 930 y 4205m s.n.m., caracterizado por temperaturas bajas y elevada humedad con una precipitación media anual dentro del área que oscila entre 750 – 1 250 mm, valores que coinciden con los registros del Cajas y las zonas adyacentes analizadas en los documentos (Mosquera et al., 2022). En este contexto, el estudio comprende varios puntos distribuidos dentro de la microcuenca Zhucay, perteneciente al Área de Conservación y Uso Sustentable (ACUS) Yanuncay–Zhucay conforme se muestra en ilustración 1 y en la tabla 7 (Anexo).

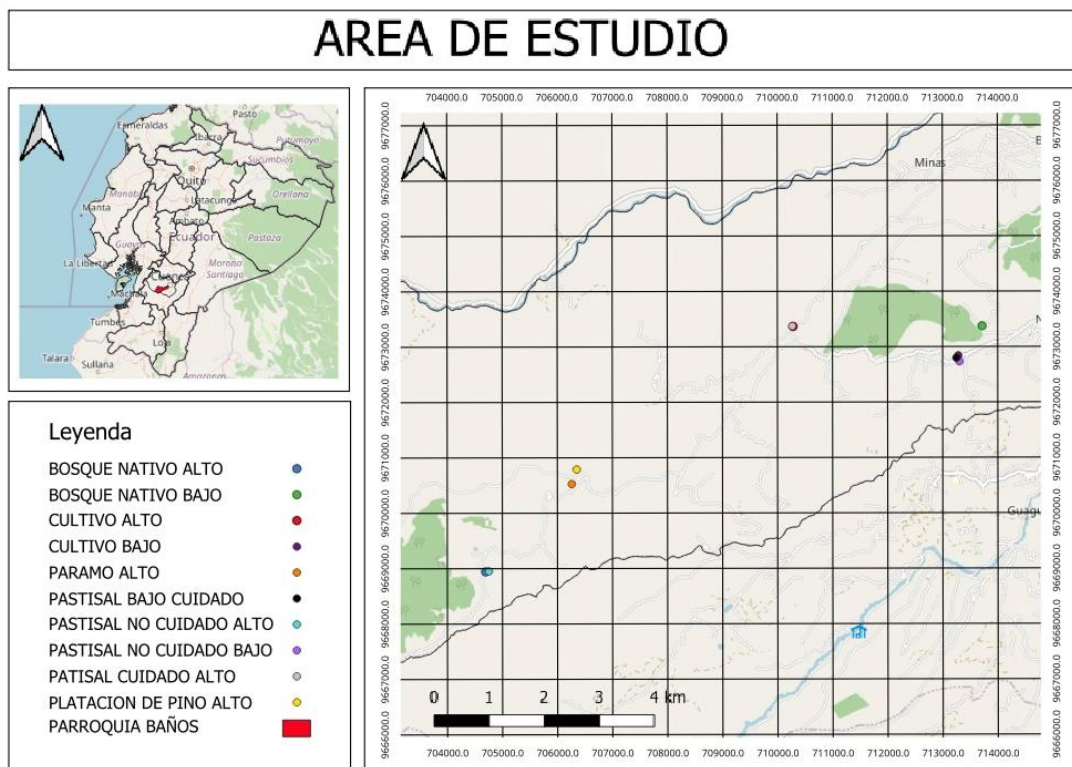


Ilustración 1 Mapa de la zona y ubicación de los puntos de muestreo
Fuente: Elaboración propia (2026)

2.2. Diseño de muestreo

Una vez seleccionados los puntos de interés (Tabla 7 Anexos) se obtuvieron muestras representativas de cada parcela (3 por sitio) de 10 × 10 cm en cada uno de los diferentes sitios de uso de suelo, con el objetivo de obtener información representativa del horizonte superficial del suelo. En cada parcela se recolectaron muestras a dos profundidades, la primera correspondiente a 0–10 cm, donde se concentra la mayor cantidad de materia orgánica del suelo (MOS) y actividad biológica, y la segunda a 40–50 cm, que permite evaluar las características fisicoquímicas del suelo en capas más profundas. Este procedimiento garantiza una adecuada caracterización del perfil edáfico en cada sitio, permitiendo comparar la variabilidad del suelo entre diferentes usos y profundidades. Adicionalmente mediante el uso de latas circulares en cada parcela se extrajeron dos muestras inalteradas, a 10 cm y 50 cm, para la determinación de densidad aparente (DA).

2.3. Análisis de laboratorio

2.3.1. Determinación de la densidad aparente (DA)

La densidad aparente es la relación entre el peso del suelo seco en la estufa a 105°C durante 24 horas y el volumen ocupado por el suelo, expresados en g cm⁻³ (Alvarado y Forsythe 2005).

$$DA \text{ g / cm}^3 = \frac{\text{Peso seco (cilindro + suelo) (g)} - \text{Peso cilindro (sin suelo) (g)}}{\text{Volumen del cilindro (ml)}}$$

2.3.2. Determinación de la textura del suelo

El análisis de textura por el método de Bouyoucos modificado en especial para estos tipos de suelo de tipo volcánico se minimizó la agregación alofónica, el efecto de la materia orgánica y la floculación. Para ello, se realizó un pretratamiento oxidando la materia orgánica con Peróxido al 30%, se empleó como agente dispersante una mezcla de 7,5 g fosfato disódico (Na₂HPO₄) calcinado a 650 °C y 1,59 g de carbonato de sodio (Na₂CO₃) disueltos en 200 ml de agua destilada.

Las muestras fueron saturadas con 5ml de dispersante y 200 ml de agua y sometidos a dispersión mecánica durante 5 min, inmediatamente se traspasó a una probeta de 1000 ml, se completó con agua y después de una rápida agitación invirtiendo 20 veces se realizó

dos lecturas con el hidrómetro durante los primeros 40 segundos y luego después de 2 horas posterior a la primera lectura.

Finalmente se usaron las siguientes fórmulas:

$$\%(\text{limo}+\text{arcilla}) = \frac{R_{40s,corr}}{40} \times 100$$

$$\%\text{arcilla} = \frac{R_{2h,corr}}{40} \times 100$$

$$\%\text{limo} = \%(\text{limo}+\text{arcilla}) - \%\text{arcilla}$$

$$\%\text{arena} = 100 - \%(\text{limo}+\text{arcilla})$$

2.3.3. Determinación del pH del suelo

La reacción del suelo (pH) se midió en tres relaciones: solución 1:2,5 (p/v) con agua destilada, CaCl₂ 0,01 M y KCl 1 N, dichas suspensiones se agitaron por 30 min y se dejaron reposar 30 min antes de la lectura con potenciómetro previamente calibrado con soluciones tampón de pH 4,0 y 7,0 (Silva et al., 2026). Los tres métodos se midieron como referencia metodológica; para el análisis estadístico y discusión se empleó únicamente el pH en H₂O por ser el estándar comparativo en estudios de suelos altoandinos ecuatorianos y el utilizado en la literatura de referencia citada en este trabajo.

2.3.4. Determinación de la humedad gravimétrica post-drenaje (HGPD)

Las muestras se saturaron y se dejaron drenar durante 48 horas; se calculó mediante la diferencia entre suelo húmedo y suelo seco a 105 °C.

$$\%\text{Humedad Gravimétrica} = \frac{\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} \times 100$$

2.3.5. Determinación del contenido de materia orgánica del suelo (% MOS) y existencia del carbono orgánico del suelo (COS)

La materia (MOS) y carbono orgánico (COS) del suelo se determinaron en base secas y tamizadas con una malla de 2mm, por ignición, a 550 °C, durante 24 horas, y un factor de conversión (f) para calcular el contenido de C. Debido a las características (Andosoles e Histosoles) del tipo de suelo este factor puede variar, se utilizaron dos valores: f = 0.58 (factor de Van Bemmelen convencional) y f = 0.724 (ajustado para suelos con alta fracción orgánica estabilizada), lo que permite estimar el rango probable de

almacenamiento en lugar de una cifra única potencialmente sesgada (Gallardo-Lancho, 2016). Durante el proceso se asumió fragmentos grueso igual a cero, dado que no se realizó una valoración directa de grava en campo como tal.

Para el cálculo de la MOS se realizó mediante la siguiente fórmula.

$$\%MOS = \frac{\text{Peso Suelo Seco} - \text{Peso Suelo Quemado}}{\text{Peso Suelo Seco}} \times 100$$

Para evitar inconsistencias en las existencias COS, la fórmula utilizada debe integrar adecuadamente todas las conversiones necesarias de manera que el resultado final represente las existencias de carbono en toneladas por hectárea (t C ha^{-1}).

$$\text{COS (t C ha}^{-1}\text{)} = (\text{MOS}/100) \times f \times \text{DA (g cm}^{-3}\text{)} \times e \text{ (cm)} \times 10$$

2.4. Análisis estadístico

Los datos se organizaron en una tabla de variables edáficas con el uso del suelo y la profundidad como factores de clasificación. Se aplicó un análisis de varianza bifactorial (ANOVA de dos vías) con el test post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) para detectar diferencias significativas entre medias según uso del suelo y profundidad. Complementariamente, se realizaron matrices de correlación de Pearson y Spearman para evaluar las relaciones entre propiedades edáficas; y un análisis de componentes principales (ACP) para identificar las tendencias multivariadas entre las propiedades edáficas. Ambos análisis se ejecutaron en RStudio.

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades edáficas generales

La Tabla 1 resume los valores de DA, MOS, HGPD y pH para cada uso de suelo y profundidad. En la zona alta, los menores valores de DA se registraron en los pastizales ($0,37\text{--}0,49 \text{ g cm}^{-3}$), mientras que el páramo presentó los valores más altos de ese grupo ($0,64\text{--}0,76 \text{ g cm}^{-3}$). El bosque de pino mostró DA intermedias ($0,58\text{--}0,66 \text{ g cm}^{-3}$). En la zona baja, los suelos de cultivo presentaron la mayor DA ($0,86\text{--}0,82 \text{ g cm}^{-3}$).

Respecto al pH, todos los sitios presentaron reacciones ácidas a muy ácidas (pH 3,40–5,18 en H_2O), con los valores más bajos en el bosque de pino (3,40–3,47) y los más altos

en pastizales cuidados de ambas zonas altitudinales (5,07–5,18). La HGPD fue marcadamente mayor en los pastizales de la zona alta (67,5–79,9%) en comparación con los sitios de zona baja (29,6–46,9%), evidenciando diferencias en la retención hídrica asociadas al tipo de cobertura y altitud.

Tabla 1. Propiedades edáficas por uso de suelo y profundidad en la microcuenca de Zhucay.

Zona	Uso de suelo	DA (g cm ⁻³)		MOS (%)		HGPD (%)		pH (H ₂ O)	
		0–10 cm	40–50 cm	0–10 cm	40–50 cm	0–10 cm	40–50 cm	0–10 cm	40–50 cm
Alta	Páramo	0,640	0,759	23,10	16,56	49,14	38,37	3,66	4,18
Alta	Pastizal cuidado	0,370	0,409	47,35	42,83	67,54	70,16	5,18	4,88
Alta	Pastizal no cuidado	0,389	0,488	41,44	28,53	79,88	76,39	3,77	3,85
Alta	Bosque de pino	0,584	0,657	27,08	20,27	55,41	49,86	3,40	3,47
Alta	Bosque nativo	0,453	0,548	33,73	22,58	63,00	62,34	3,55	3,44
Alta	Cultivo	0,414	0,364	48,55	45,11	71,08	80,23	4,57	4,33
Baja	Pastizal cuidado	0,678	0,811	20,47	16,95	44,21	37,43	4,55	4,35
Baja	Pastizal no cuidado	0,678	0,646	19,42	14,33	46,98	44,70	5,07	4,87
Baja	Bosque nativo	0,665	0,748	18,87	15,72	29,61	28,75	3,98	3,77
Baja	Cultivo	0,860	0,818	18,23	18,38	29,87	30,95	4,24	3,95

Nota. DA = densidad aparente; MOS = materia orgánica del suelo por calcinación a 550 °C; HGPD = humedad gravimétrica post-drenaje; pH medido en suspensión suelo: agua 1:2.5. Los valores corresponden al promedio de tres réplicas por sitio. Fuente: Elaboración propia (2026)

3.2. Textura del suelo

El análisis por Bouyoucos presentó una sobre estimación de arena (78-92%; Tabla 2), incoherentes con los valores esperados para Andosoles en literaturas regionales revisadas. Siendo la causa del sesgo las limitaciones inherentes al método hidrométrico usado en laboratorio el cual produce una sobreestimación sistemática de la fracción arena, debido a que la fórmula de Bouyoucos asume una densidad real de partículas de 2,65 g cm⁻³, mientras que los Andosoles presentan valores de 1,37–1,50 g cm⁻³ (Dahlgren et al., 2004). Según la ley de Stokes, la menor densidad real provoca que las partículas finas sedimenten más lentamente de lo esperado, siendo registradas como arena. Por lo tanto, los datos de textura obtenidos en laboratorio no fueron incluidos para el análisis y sólo se reportaron como evidencia. Los valores de referencia para esa zona se obtuvieron de literatura

científica sobre Andosoles andinos (Buytaert et al., 2006), tomando en cuenta los horizontes AH y A (Tabla 3).

Tabla 2 Composición textural (%) por uso de suelo y profundidad.

Zona	Uso de suelo	Arena (%)		Limo (%)		Arcilla (%)		Clase textural Predominante
		0–10 cm	40–50 cm	0–10 cm	40–50 cm	0–10 cm	40–50 cm	
Alta	Páramo	81,8	83,4	12,1	2,5	6,2	14,1	Arenoso franco
Alta	Pastizal cuidado	90,9	88,0	7,5	5,0	1,6	7,1	Arenoso
Alta	Pastizal no cuidado	91,8	90,9	6,6	2,5	1,6	6,6	Arenoso
Alta	Bosque de pino	78,4	79,3	5,0	4,6	16,6	16,2	Arenoso franco
Alta	Bosque nativo	86,4	86,8	9,6	6,6	4,1	6,6	Arenoso
Alta	Cultivo	88,4	88,4	7,5	5,0	4,1	6,6	Arenoso
Baja	Pastizal cuidado	68,4	63,4	12,5	27,5	19,1	9,1	Franco arenoso
Baja	Pastizal no cuidado	65,0	51,8	10,9	4,1	24,1	44,1	Franco arcilloso
Baja	Bosque nativo	72,3	63,4	21,6	5,0	6,2	31,6	Franco arenoso
Baja	Cultivo	60,9	71,8	32,5	26,6	6,6	1,6	Franco

Nota. Datos de laboratorio por método Bouyoucos modificado con pretratamiento para suelos ándicos. En la zona alta (Andosoles), los valores de arena (78–92%) están sobreestimados por la baja densidad real de partículas de estos suelos y se reportan con fines documentales únicamente. La textura no fue incluida en los análisis, se utiliza solamente como evidencia. Fuente: Elaboración propia (2026)

Tabla 3. Promedios de textura del suelo (arena, limo y arcilla%) por uso de suelo o zona de estudio

Horizonte	Arena%	Limo%	Arcilla%
Ah (promedio)	24,0	38,4	37,6
A (promedio)	31,1	31,1	37,1
Promedio general (Ah + A)	27,6	35,2	37,2

Nota. Promedios tomados de la tabla 4 de Buytaert et al. (2006). Exclusivamente de los horizontes AH y A de las topo secuencias Haugrauma (HU) y Ningar (NG) detalladas en el artículo, excluyendo C y H.

3.3. Existencias de carbono orgánico del suelo (COS)

Las existencias de COS calculadas se presentan en la Tabla 4, En la zona alta se encontraron valores totales altos de COS (0–50 cm) con el $f_1 = 0.58$; en el cultivo (21,1 t C ha⁻¹) y en el pastizal cuidado (20,3 t C ha⁻¹), ambos con elevados contenidos de MOS. A diferencia de la zona baja los contenidos de COS fueron los más bajos como en los pastizales no cuidado y el bosque nativo presentaron los menores valores (13,0 y 14,0 t C ha⁻¹, respectivamente), a pesar de su relevancia ecológica como ecosistemas de referencia. En la zona baja, el cultivo presentó el mayor COS total (17,8 t C ha⁻¹ con $f = 0.58$) por debajo de la zona alta, posiblemente asociado a procesos de degradación del

suelo. Al momento de aplicar el factor $f = 0,724$, los valores totales ascendieron entre un 24–25% en todos los sitios. El rango total de estimación para el perfil 0–50 cm fue de 13,0–21,1 t C ha⁻¹ con el primer factor ($f = 0,58$) y 16,2–26.4 t C ha⁻¹ con el segundo factor ($f = 0,724$), lo que evidencia la sensibilidad del modelo al factor de conversión empleado y la importancia de reportar ambos límites ante la incertidumbre metodológica inherente a los Andosoles.

Tabla 4 Existencias de carbono orgánico del suelo (COS, t C ha⁻¹) estimadas con dos factores de conversión ($f = 0.58$ y $f = 0.724$) por profundidad y uso de suelo.

Zona	Uso de suelo	$f = 0.58$ (Van Bemmelen)–COS (t C ha ⁻¹)			$f = 0.724$ – COS (t C ha ⁻¹)		
		0–10 cm	40–50 cm	Total 0–50 cm	0–10 cm	40–50 cm	Total 0–50 cm
Alta	Páramo	8,575	7,290	15,865	10,704	9,100	19,804
Alta	Pastizal cuidado	10,161	10,160	20,321	12,684	12,683	25,367
Alta	Pastizal no cuidado	9,350	8,075	17,425	11,671	10,080	21,751
Alta	Bosque de pino	9,173	7,724	16,897	11,450	9,642	21,092
Alta	Bosque nativo	8,862	7,177	16,039	11,062	8,959	20,021
Alta	Cultivo	11,658	9,524	21,181	14,552	11,888	26,440
Baja	Pastizal cuidado	8,050	7,973	16,023	10,048	9,952	20,001
Baja	Pastizal no cuidado	7,637	5,369	13,006	9,533	6,702	16,235
Baja	Bosque nativo	7,278	6,820	14,098	9,085	8,513	17,598
Baja	Cultivo	9,093	8,720	17,813	11,351	10,885	22,236

Nota. COS calculado como: $COS (t C ha^{-1}) = (MOS\%/100) \times f \times DA (g cm^{-3}) \times e (cm) \times 10$. Se asumió fracción de fragmentos gruesos (Fgr) = 0. Los valores por perfil representan la suma de los estratos 0–10 cm y 40–50 cm. f = factor de conversión MOS a carbono orgánico. Fuente: Elaboración propia (2026)

3.4. Análisis estadístico

ANOVA de dos vías y prueba de tukey: El análisis no evidenció efectos significativos del uso de suelo sobre ninguna de las propiedades edáficas evaluadas: Los valores de dispersión dentro de cada uno de los seis usos del suelo se presentan en la ilustración 2, donde cada boxplot muestra la distribución de los datos por uso de suelo diferenciando las dos profundidades de muestreo (0-10 cm y 40-50 cm).

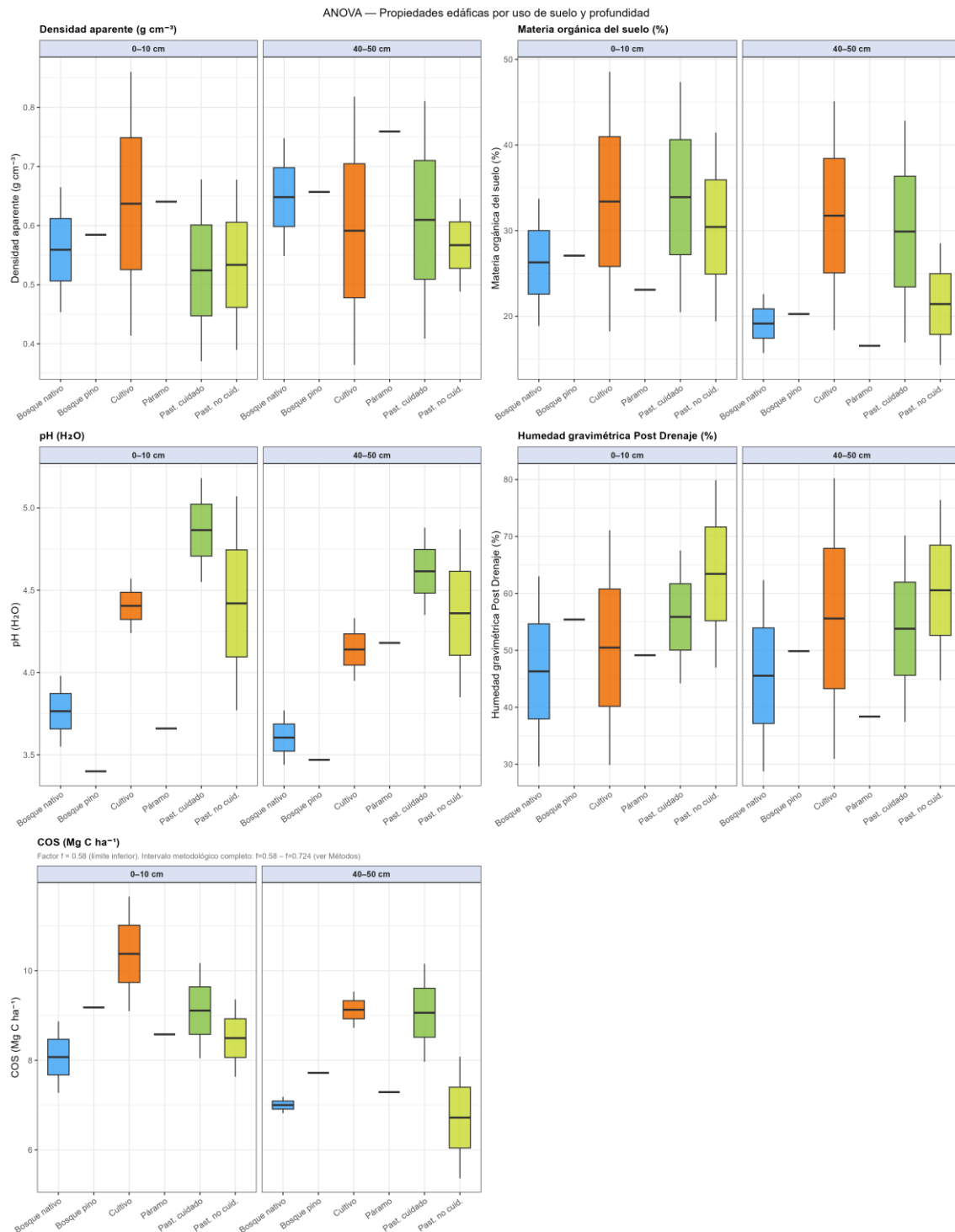


Ilustración 2. Panel de boxplots del ANOVA bifactorial: propiedades edáficas por uso de suelo y profundidad. Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados del ANOVA bifactorial con prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), indicaron que ningún factor edáfico presentó diferencias estadísticas que se atribuyan al uso del suelo ($p > 0,05$ en todos los casos). Los valores estadísticos (F) más bajos pertenecen DA ($F=0,135$; $p=0,980$) y para interacción Uso-Profundidad fue en MOS ($F=0,027$; $p=1,000$). La variable que más se aproximó a la significancia fue el pH ($F=2,974$; $p=0,083$)

Tabla 5. Resultados del ANOVA bifactorial (Tipo II) para las propiedades edáficas en la microcuenca de Zhucay. Factor A: uso de suelo (6 niveles); Factor B: profundidad (2 niveles); $n = 20$ corresponde al número de unidades de análisis (10 sitios \times 2 profundidad)

Variable	Factor	F	p-valor	Sig.
Densidad aparente (g cm ⁻³)	Uso de suelo	0,135	0,980	ns
	Profundidad	0,249	0,631	ns
	Uso \times Prof.	0,056	0,997	ns
Materia orgánica del suelo (%)	Uso de suelo	0,340	0,875	ns
	Profundidad	0,653	0,443	ns
	Uso \times Prof.	0,027	0,999	ns
Humedad Gravimétrica post-drenaje (%)	Uso de suelo	0,225	0,942	ns
	Profundidad	0,024	0,880	ns
	Uso \times Prof.	0,031	0,999	ns
pH (H ₂ O)	Uso de suelo	2,974	0,083	ns
	Profundidad	0,157	0,703	ns
	Uso \times Prof.	0,211	0,948	ns
COS — $f=0.58$ (Mg C ha ⁻¹)	Uso de suelo	1,639	0,254	ns
	Profundidad	3,303	0,107	ns
	Uso \times Prof.	0,181	0,962	ns

Nota. F = estadístico de Fisher; p = p-valor; Sig. = significancia: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, ns = no significativo ($p > 0.05$). $df_{nes} = 8$. El análisis se realizó en R v4.x con la función aov(). El COS se analizó con $f = 0.58$ (límite inferior del intervalo metodológico; los resultados son invariantes con $f = 0.724$). Fuente: Elaboración propia (2026).

Correlaciones de Pearson y Spearman: se realizó un análisis para evaluar las relaciones lineales y monótonas entre las variables edáficas: (DA, MOS, HGPD, PH, COS Y Altitud). La tabla 6 muestra la correlación de Pearson con relaciones negativas fuertes como DA-HGPD ($r = -0,934$; $p = -0,911$), y DA-MOS ($r = 0,903$; $p = -0,871$) indicando a la DA como principal factor de la calidad física del suelo. Las correlaciones MOS-HGPD ($r = 0,847$; $p = 0,871$) mostraron un positivo más fuerte; otras correlaciones de moderada intensidad fueron DA-COS ($r = -0,553$; $p = -0,568$), MOS-COS ($r = 0,833$; $p = 0,815$). La altitud también demostró correlaciones significativas con HGPD ($r = 0,467$; $p = 0,083$) Y pH ($r = -0,453$; $p = 0,045$).

Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ).

Tabla Resumen de correlaciones PEARSON- SPEARMAN					
Variable1	Variable2	r_Pearson	p_Pearson	rho_Spearman	p_Spearman
DA	MOS	-0,903	0	-0,871	0
DA	HGPD	-0,934	0	-0,911	0
DA	pH	-0,123	0,6047	-0,041	0,8625
DA	COS_f058	-0,553	0,0114	-0,568	0,0089
DA	COS_f0724	-0,553	0,0114	-0,568	0,0089
DA	Altitud	-0,364	0,115	-0,406	0,0759
MOS	HGPD	0,847	0	0,871	0
MOS	pH	0,241	0,3068	0,057	0,8108
MOS	COS_f058	0,833	0	0,815	0
MOS	COS_f0724	0,833	0	0,815	0
MOS	Altitud	0,253	0,2822	0,4	0,0808
HGPD	pH	0,05	0,8348	0,009	0,9699
HGPD	COS_f058	0,549	0,0121	0,624	0,0033
HGPD	COS_f0724	0,549	0,0121	0,624	0,0033
HGPD	Altitud	0,467	0,0381	0,536	0,0149
pH	COS_f058	0,161	0,4966	0,203	0,3905
pH	COS_f0724	0,161	0,4965	0,203	0,3905
pH	Altitud	-0,453	0,045	-0,48	0,0321
COS_f058	COS_f0724	1	0	1	0
COS_f058	Altitud	0,176	0,4589	0,203	0,391
COS_f0724	Altitud	0,176	0,4589	0,203	0,391

Nota. DA = densidad aparente; MOS = materia orgánica del suelo; HGPD = humedad gravimétrica post-drenaje; COS = carbono orgánico del suelo. Correlaciones significativas ($p < 0,05$) en negrita. Análisis realizado en RStudio. Fuente: Elaboración propia (2026).

Análisis de componentes principales (ACP): Se aplicó sobre una matriz de 6 variables edáficas (DA, MOS, HGPD, pH, COS, Altitud), donde el ACP representó el 83,0% de la varianza total (CP1: 58,4%, CP2: 24,6%) superando el umbral de lo aceptado. CP1 está dominado por tres variables MOS (26.8%), DA (25.2%) Y HGPD (24.9%) representando la calidad y acumulación orgánica del suelo. El CP2 presenta un opuesto dominados por pH (53,1%) y Altitud (41,0%) representando una gradiente de acidez en base a la altitud (Ilustración 3).

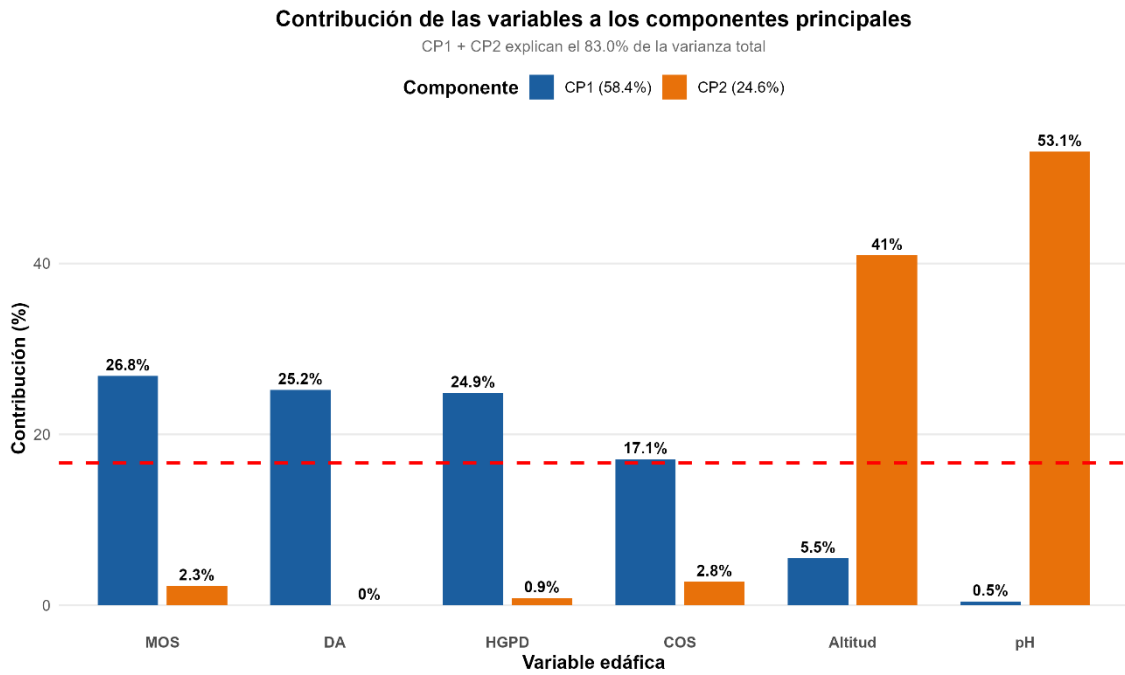


Ilustración 3. Contribución porcentual de las variables edáficas a los componentes principales CP1 y CP2 Fuente: Elaboración propia (2026).

Biplot por zona altitudinal: En la ilustración 4 muestra una separación clara y completa entre los sitios de la zona alta ($n = 12$; CP1 media = 1.138) y los de la zona baja ($n = 8$; CP1 media = -1.707), sin solapamiento entre las elipses de confianza al 95%. Los sitios de la zona alta se proyectan hacia valores positivos de CP1, asociándose con alta MOS, alto HGPD y bajo DA, mientras que los sitios de la zona baja se ubican en el cuadrante negativo de CP1, reflejando menores contenidos orgánicos y mayor densidad aparente.

Biplot ACP — Agrupación por zona altitudinal

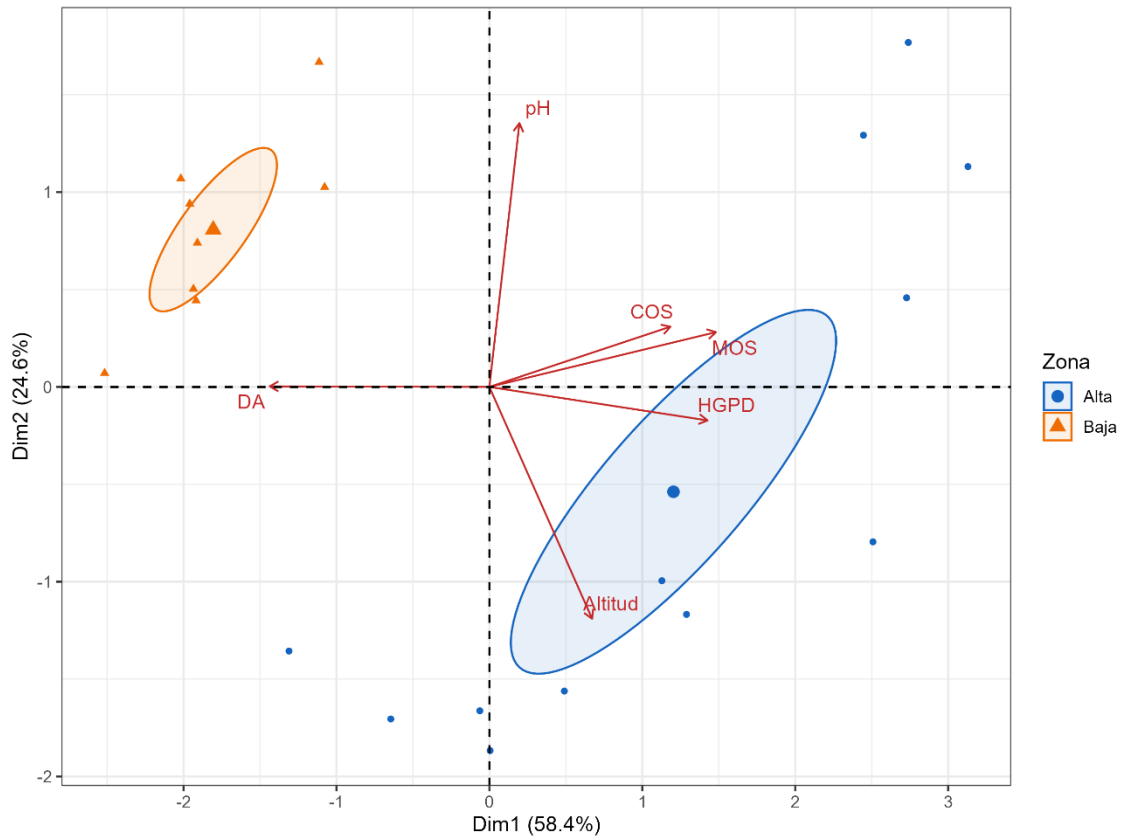


Ilustración 4. Biplot del ACP por zona altitudinal. Las elipses de confianza muestran separación clara entre zona alta (azul) y zona baja (naranja). Fuente: Elaboración propia (2026).

Biplot por profundidad: En la ilustración 5 se muestra una separación moderada entre los sitios de 0–10 cm (CP1 media = 0.234; CP2 media = 0.244) y los de 40–50 cm (CP1 media = -0.234; CP2 media = -0.244), sin solapamiento entre las elipses de confianza al 95%. Los sitios superficiales (0–10 cm) tienden a desplazarse hacia valores ligeramente más positivos en ambas dimensiones, asociándose con mayor MOS y HGPD más elevado en la capa superficial, donde se concentra la actividad biológica y la descomposición de materia orgánica. Los sitios de capa profunda (10–50 cm) se desplazan en sentido opuesto, reflejo de la disminución gradual de MOS con la profundidad y la mayor acidez en el horizonte subsuperficial.

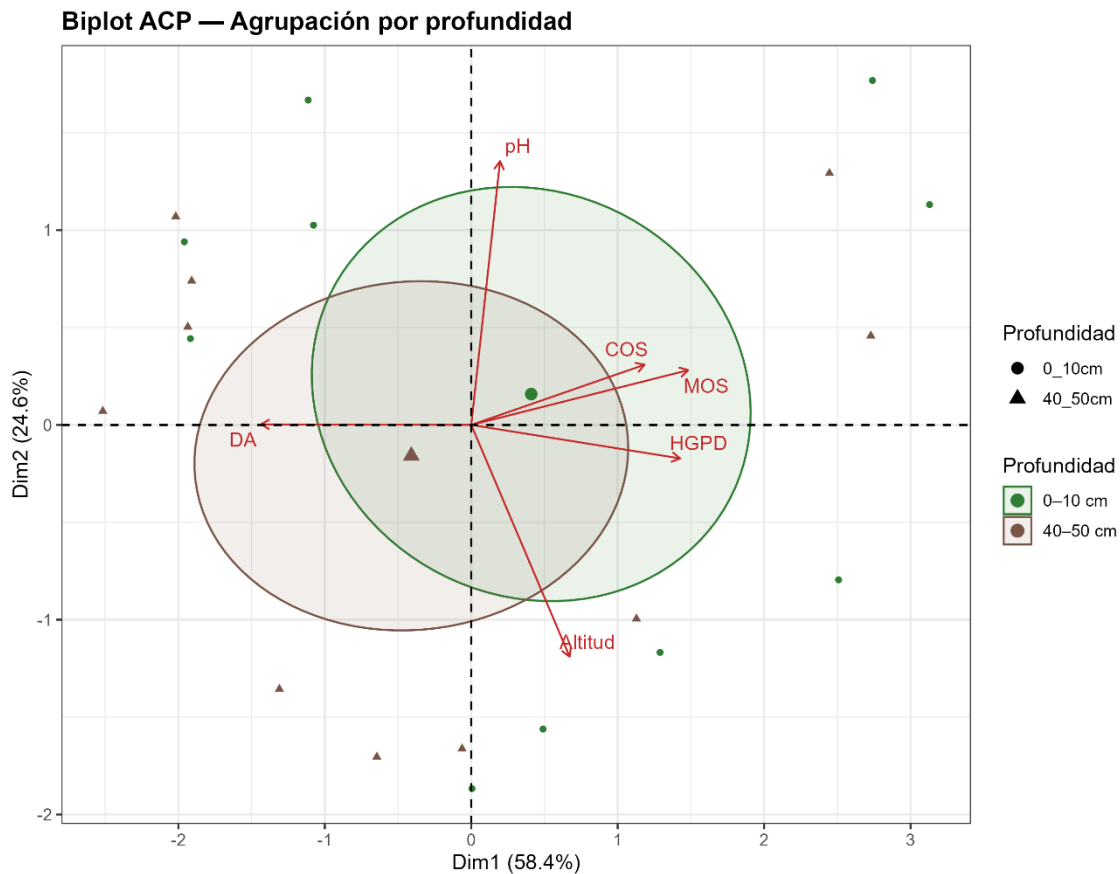


Ilustración 5. Biplot del ACP por profundidad. Fuente: Elaboración propia (2026).

4. DISCUSIÓN

El Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió identificar que la altitud es un factor significativo de las reservas de COS dentro de la microcuenca de Zhucay. El primer componente (CP1), que por sí solo explicó aproximadamente el 60 % de toda la variación observada (58,37 %), estuvo liderado por tres variables estrechamente relacionadas: la densidad aparente (DA, 25,20 %), la materia orgánica del suelo (MOS, 26,83 %) y la humedad gravimétrica post-drenaje (HGPD, 24,86 %), este eje separó con claridad la zona altitudinal alta (CP1 media = 1,138) de la zona baja (CP1 media = -1,707). El segundo componente (CP2), que explicó cerca del 25 % adicional de la varianza, capturó el gradiente de acidez vinculado a la altitud, con pH y altitud como contribuyentes principales (53,09 % y 40,99 %, respectivamente). En conjunto, ambos componentes explicaron el 83,01 % de la variabilidad total. Por otro lado, el ANOVA bifactorial no detectó diferencias significativas entre los distintos usos de suelo. Esto no significa que esas diferencias no existan, sino que el análisis univariado tuvo dificultades para detectarlas, lo que se atribuye a la alta heterogeneidad espacial de los Andosoles y al

diseño muestral de 20 unidades de análisis (promedios de 3 réplicas por sitio), que limitó y redujo la potencia estadística del análisis univariado; no obstante, el ACP multivariado resultó ser la herramienta más adecuada, ya que permitió identificar la estructura subyacente del sistema.

El patrón observado tiene una explicación bastante directa: a mayor altitud, menor temperatura, y esto disminuye la actividad de los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica, favoreciendo su acumulación progresiva en el suelo (Jobbágy & Jackson, 2000). En Zhucay, este mecanismo se expresa con claridad: mientras que, en la zona alta, la MOS osciló entre 16 y 48 % y la DA se mantuvo baja entre 0,37 y 0,66 g cm⁻³, en la zona baja la MOS se redujo a 14–20 % y la DA aumentó a 0,64–0,86 g cm⁻³. Es decir, suelos más ligeros y orgánicamente ricos en las partes altas, frente a suelos más compactos y con menor contenido orgánico en las partes bajas. Esta lógica también se ve en Quichimbo et al. (2012), en suelos de Quimsacocha (Azuay), documentaron que la combinación de baja temperatura, alta humedad y baja presión atmosférica explica la acumulación orgánica característica de los Andosoles altoandinos. En la misma línea Silva Padilla et al. (2026), reporta que suelos con DA cercanas a 1,17 g cm⁻³ y mayor humedad (50,81 %) tendieron a concentrar más carbono. Finalmente, Hurtado-Naranjo et al. (2023), aportan evidencia al documentar COS de 35,67 t C ha⁻¹ en zonas de intervención alta y 28,05 t C ha⁻¹ en zonas intermedias, confirmando que el gradiente altitudinal opera como un regulador de la acumulación de COS en estos ecosistemas.

La densidad aparente actuó como eje integrador de la calidad física del suelo, articulando el efecto altitudinal sobre las reservas de carbono. En cuanto a la matriz de correlación reveló fuertes asociaciones y estadísticamente significativas: DA–MOS (Pearson $r = -0,903$; Spearman $\rho = -0,871$) y DA–HGPD (Pearson $r = -0,934$; Spearman $\rho = -0,911$), todas con $p < 0,001$. Asimismo, la correlación de MOS–HGPD ($r = 0,847$; $p < 0,001$) reflejó la alta porosidad característica de estos suelos. Esta interdependencia entre DA, MOS y HGPD es documentada por Quichimbo et al. (2012), quienes señalan que el contenido de carbono orgánico es el factor determinante de la capacidad hídrica en suelos andinos de tipo volcánico: a menor compactación, mayor es la retención hídrica y mayor la acumulación de MOS.

La textura y el pH del suelo actuaron como variables de soporte que refuerzan el patrón altitudinal descrito. En cuanto a textura, Buytaert et al. (2006) confirman que los

horizontes AH y A de los Andosoles andinos presentan en promedio un 27,6 % de arena y un 72,4 % de limo y arcilla, indicando texturas predominantemente francas. Esta proporción elevada de partículas finas favorece la estabilización del carbono orgánico mediante mecanismos de complejación, donde las arcillas e hidróxidos de Al y Fe forman enlaces con los compuestos húmicos, protegiéndolos de la mineralización microbiana (Dahlgren et al., 2004). En cuanto al pH, el rango registrado en Zhucay (3,40–5,18) es típico de Andosoles andinos, donde la acumulación de ácidos orgánicos y la meteorización del material volcánico generan acidez intrínseca (Dahlgren et al., 2004). Los valores concuerdan con lo reportado por Guamán Medina & Urgiles Duta (2024) para bosque de pino (pH 3,4–4,9) y bosque natural (pH 3,5–4,8) en el bosque Sunsun Yanasacha. El patrón inverso entre pH y MOS observado en Zhucay puede explicarse por la menor actividad microbiana en medios ácidos, la cual desacelera la descomposición y favorece la acumulación de MOS (Quichimbo et al., 2012).

Un hallazgo destacable es que el uso actual del suelo tuvo menor peso explicativo que la zona altitudinal sobre las reservas de COS. Los pastizales cuidados y cultivos de la zona alta registraron stocks de COS de 21,2 y 20,3 t C ha⁻¹, respectivamente, superando al páramo (15,9 t C ha⁻¹). Este resultado, que podría parecer contraintuitivo, se explica por la asociación de estos usos con DA bajas (0,37–0,41 g cm⁻³) propias de la zona alta, en contraste con el páramo evaluado que presentó una DA mayor. López Zamora (2011), en su caracterización ecosistémica de la cuenca media del río Paute, identificó que la transición de pastizales abandonados hacia matorrales y bosque fue el factor más asociado a las propiedades edáficas, lo que respalda la idea de que las condiciones altitudinales y la historia de uso interactúan de manera compleja sobre el almacenamiento de carbono.

Las reservas de COS estimadas para Zhucay (13,0–21,2 t C ha⁻¹ con $f = 0,58$; 16,2–26,4 t C ha⁻¹ con $f = 0,724$) se ubican dentro del rango reportado para Andosoles altoandinos ecuatorianos. El intervalo entre factores de conversión fue una decisión metodológica conservadora, dado que el factor $f = 1,724$ asume un 58 % de C en MOS y subestima el COS en la mayoría de suelos globales (Pribyl, 2010). Los valores son inferiores a los de Hurtado-Naranjo et al. (2023), lo que es consistente con las diferencias altitudinales y de cobertura entre estudios. Por su parte, Guamán Medina & Urgiles Duta (2024) reportaron acumulaciones de MOS entre 80 y 93 % en horizontes orgánicos superficiales (Oi, Oe, Oa) del bosque Sunsun Yanasacha, valores superiores a los registrados en Zhucay (23–48 %). Esta diferencia se justifica porque dicho estudio analizó horizontes orgánicos no

minerales, mientras que el presente trabajo evaluó el suelo mineral a profundidades de 0–10 cm y 40–50 cm, donde los componentes inorgánicos atenúan el porcentaje de MOS.

5. CONCLUSIONES

Las reservas de carbono orgánico del suelo en la microcuenca de Zhucay oscilaron entre 13,0 y 21,2 t C ha⁻¹ ($f = 0,58$) y entre 16,2 y 26,4 t C ha⁻¹ ($f = 0,724$), evidenciando una diferencia del 24,8% entre factores que refleja el optar por un intervalo de confianza en lugar de un valor único. El análisis univariado no detectó diferencias estadísticas significativas asociadas al uso actual del suelo; sin embargo, el ACP explicó el 83,01% de la variabilidad total con separaciones completas entre zonas altitudinales en CP1(58,37%), la altitud demostró una asociación más fuerte con el comportamientos del COS que la cobertura actual del suelo.

Las correlaciones observadas entre DA–MOS ($r = -0,903$; $p < 0,001$) y DA–HGPD ($r = -0,934$; $p < 0,001$) muestran que la calidad física del suelo actúa como mecanismo integrador del almacenamiento de carbono, donde suelos menos compactados y con mayor acumulación de materia orgánica presentan condiciones ideales para la conservación de carbono en ecosistemas altoandinos.

Los resultados demuestran que las propiedades edáficas como: la densidad aparente, la materia orgánica y la humedad gravimétrica post-drenaje constituyeron las variables edáficas con mayor capacidad explicativa sobre el almacenamiento de carbono. En la microcuenca Zhucay, el gradiente altitudinal y la calidad física del suelo ejercieron un mayor control sobre las reservas de carbono que el uso actual del territorio, destacando su importancia para la conservación de ecosistemas altoandinos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 85–94. <https://doi.org/10.15517/rac.v29i1.60289>
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Calderón-Guevara, M. N., Carpio-Rivera, N. Y., & Galarza-Mora, W. G. (2025). Agricultura sostenible y sumideros de carbono en Ecuador: oportunidades de mitigación climática y acceso a los mercados de carbono. *MQRInvestigar*, 9(4), e1324. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.9.4.2025.e1324>
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy*, 82, 113–182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82001-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82001-5)
- FAO. (2021). Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gallardo-Lancho JF. 2016. La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental, Salamanca, España. 492 p.
- Guamán Medina, N. J., & Urgiles Duta, K. A. (2024). *Caracterización de horizontes orgánicos en cuatro tipos de cobertura vegetal en una zona de la parte alta de Nero* [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>
- Hurtado-Naranjo, M. A., Alulema-Del Salto, R. A., & Palacios-Cabrera, T. A. (2023). Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 16(2), 79–92. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4323>
- IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- López Zamora, J. J. (2011). Caracterización ecosistémica de la cuenca media del río Paute, con fines de restauración ecológica [Trabajo de graduación, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay.
- MAATE. 2023. *Informe de deforestación del Ecuador continental 2020–2022*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Quito
- Mondragón Valencia, V. A., Figueroa Casas, A., Macias Pinto, D. J., & Rosas-Luis, R. (2025). Soil organic carbon storage in different land uses in tropical Andean ecosystems and the Socio-ecological environment. *Earth (Basel, Switzerland)*, 6(3), 106. <https://doi.org/10.3390/earth6030106>
- Mosquera, F; D. Moscoso; Escobedo, R y E. Arias (2022). Expediente para la creación del Área de conservación y Uso Sustentable Yanuncay – Zhucay (ACUS YZ). Tomo 1: Plan de Manejo del Área de Conservación y Uso Sustentable Yanuncay - Zhucay (ACUS YZ). Ed: Pesántez y Arévalo, 2022. Naturaleza & Cultura Internacional, GAD Municipal de Cuenca, Junta Administradora de Agua Potable y Saneamiento Nero, GAD Parroquial de Baños, GAD Parroquial de San Joaquín, GAD Parroquial de Chaucha, GAD Parroquial de Victoria del Portete, Fondo para la conservación de la cuenca del río Paute, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, Universidad del Azuay. Cuenca – Ecuador.
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3–4), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.
- Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M., & Nunes, L. J. R. (2023). Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. *Soil Systems*, 7(3), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>
- Silva Padilla, C. F., Rivera Castillo, M. F., Damián Carrión, D. A., & Rodríguez Llerena, M. V. (2026). Cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo

diferentes usos de la tierra en la región andina de Ecuador. *Esprint Investigación*, 5(1), 128–139. <https://doi.org/10.61347/ei.v5i1.239>

7. ANEXOS

Tabla 7. Localización y características de las áreas estudiadas

Sitio de estudio (usos de suelo representativo)	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud aprox (m)	Humedad aprox (%)	Temperatura media aprox (°C)
<i>Paramo</i>	-2,979114	-79,144226	3450 m	68.0 %	19.5°c
<i>Bosque andino alto</i>	-2.993469	-79.158318	3204 m	83.7 %	17.1°c
<i>Bosque de pino alto</i>	-2.977392	-79.141953	3265 m	58.2 %	20.1°c
<i>Zona de cultivo alto</i>	-2.953353	-79.108050	3057 m	63.0 %	19.7°c
<i>Pastizales tratados alto</i>	-2.953290	-79.108197	3057 m	62.5 %	19.6°c
<i>Pastizales no tratados alto</i>	-2.993367	-79.157780	3201 m	61.2 %	20.2°c
<i>Bosque andino bajo</i>	-2.953231	-79.077341	2794 m	59.0 %	23.0°c
<i>Zona de cultivo bajo</i>	-2.958068	-79.081244	2815 m	56.0 %	22.9°c
<i>Pastizales tratados bajo</i>	-2.958450	-79.081541	2865 m	67.4 %	18.7°c
<i>Pastizales no tratados bajo</i>	-2.959026	-79.081035	2856 m	56.5 %	22.3°c

Fuente: Elaboración propia (2026).

Fotografía 1.



Fotografía 2.



Nota. Fotografía 1 muestra una toma panorámica de la zona de cultivo bajo y fotografía 2 muestra una toma panorámica de la zona de pastizal cuidado alto.

Fotografía 3.



Fotografía 4.



Nota. Fotografía 3 muestra una toma de la zona de cultivo alto, mientras que fotografía 4 muestra el método de secado de muestras.

Fotografía 5.



Fotografía 6.



Nota. Fotografía 5 muestra como preparamos nuestras muestras para transportar, mientras que fotografía 6 nos enseña una toma panorámica de la zona de estudio de bosque de pino.

Fotografía 7.



Fotografía 8.



Nota. Fotografía 7 muestra como tomamos muestras de la zona de paramo, mientras que la fotografía 8 nos muestra cómo se tomó la muestra de la zona de pastizal no cuidado alto.