



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo



RESEARCH ARTICLE

Influence of altitude and soil characteristics on organic carbon storage capacity of high Andean natural pastures

Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos

Mary L. Huamán-Carrión^{1,*} ; Francisco Espinoza-Montes² ; Abel I. Barrial-Lujan¹ ; Yalmar Ponce-Atencio¹ 

¹ Facultad de la Ingeniería, Universidad Nacional José María Arguedas, Jr. Juan Francisco Ramos N° 380, Apurímac. Peru.

² Facultad de Zootecnia, Universidad Nacional del Centro del Perú, Av. Mariscal Castilla N° 3909, Huancayo. Peru.

* Corresponding author: mhuaman@unajma.edu.pe (M.L. Huamán-Carrión).

Received: 5 August 2020. Accepted: 14 February 2021. Published: 10 March 2021.

Abstract

The soil is considered the largest carbon reservoir in nature after the oceans, its content has been studied mostly in forest ecosystems, leaving aside other important ecosystems such as high Andean natural pastures, whose plant cover is made up of species diversity, which occupy large areas. The objective of the research was to determine the influence of the altitudinal variability on the Soil Organic Carbon (SOC) storage capacity of the *Stipa*, *Festuca* and *Calamagrostis* species, as well as its relationship with the characteristics of the soils. 73 soil samples were extracted at 0.2 m depth, between altitudes of 4000 to 4410 m.a.s.l.; To determine the COS, the wet oxidation methodology was used. The results show that there is no significant difference in the accumulation of SOC of the species studied, its general mean is $364.33 \pm 48.80 \text{ t ha}^{-1}$. The correlation coefficients between the amount of SOC and altitude, sand, silt, clay, temperature and organic matter were 0.84; 0.72; -0.30; -0.56; -0.82 and 0.91, respectively. As the altitude increases the COS content increases; the variation of sand and clay in the structure of the soil, influence this process, while low temperatures favor the accumulation of carbon according to the availability of organic matter.

Keywords: High Andean natural pastures; organic carbon; storage on the ground; altitudinal variation; wet oxidation.

Resumen

El suelo se considera como el reservorio de carbono más grande en la naturaleza después de los océanos, su contenido se ha estudiado mayormente en ecosistemas forestales, dejando de lado otros ecosistemas importantes como los pastos naturales altoandinos, cuya cobertura vegetal está conformada por diversidad de especies, que ocupan grandes extensiones. El objetivo de la investigación fue determinar la influencia de la variabilidad altitudinal en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) de las especies *Stipa*, *Festuca* y *Calamagrostis*, así como su relación con las características de los suelos. Se extrajeron 73 muestras de suelo a 0,2 m de profundidad, entre las altitudes de 4000 a 4410 m.s.n.m.; para determinar el COS se empleó la metodología de oxidación húmeda. Los resultados muestran que no existe diferencia significativa en la acumulación de COS de las especies estudiadas, su media general es $364,33 \pm 48,80 \text{ t ha}^{-1}$. Los coeficientes de correlación entre la cantidad de COS y altitud, arena, limo, arcilla, temperatura y materia orgánica fueron de 0,84; 0,72; -0,30; -0,56; -0,82 y 0,91, respectivamente. A medida que se acrecienta la altitud el contenido de COS se incrementa; la variación de arena y arcilla en la estructura del suelo, influyen en este proceso, mientras que las bajas temperaturas favorecen la acumulación de carbono de acuerdo con la disponibilidad de materia orgánica.

Palabras clave: Pastos naturales altoandinos; carbono orgánico; almacenamiento en el suelo; variación altitudinal; oxidación húmeda.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.010>

Cite this article:

Huamán-Carrión, M. L., Espinoza-Montes, F., Barrial-Lujan, A. I., & Ponce-Atencio, Y. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90.

1. Introducción

Los gases de efecto invernadero, son gases de origen natural y antropogénico que están compuestos principalmente por el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O) (Olivo & Soto, 2010). El incremento de sus concentraciones, modifican el ciclo natural de la vida en la tierra, alteran los ciclos naturales del suelo (Saynes et al., 2016), del agua, regímenes de temperatura, viento y precipitaciones pluviales (Useros, 2013). Originan sequías, inundaciones, olas de calor y friaje extremo, que revierten las funciones de regulación principalmente del suelo (Power, 2009). El carbono de origen orgánico es el elemento clave, que está presente en los compuestos de la naturaleza, circula entre la atmósfera, los océanos, el suelo y el subsuelo, en su conjunto conforman los almacenes de carbono.

El intercambio de carbono entre estos depósitos, se producen a través de procesos físicos, químicos y biológicos (Martínez et al., 2008). El ciclo del carbono inicia con la fijación del CO₂ atmosférico durante la fotosíntesis (Galicia et al., 2016). En este proceso, el CO₂ y el agua a través de las reacciones químicas de estos elementos, forman los carbohidratos que a su vez permiten liberar oxígeno al medio. Una parte de carbohidratos producidos, son consumidos directamente por las plantas, proporcionándole energía, sin embargo, en este proceso las plantas liberan CO₂ a través de sus hojas o raíces (Valenzuela & Visconti, 2018). La descomposición de las plantas y los animales a través de los procesos metabólicos también liberan dióxido de carbono, por medio de la oxidación.

Dentro del ciclo global del carbono, se considera dos procesos, el bioquímico de corto plazo y el geoquímico a largo plazo, donde el suelo cumple un rol importante en la absorción del CO₂, mediante la formación del carbono orgánico e inorgánico (Ginebra et al., 2015). Por su cobertura vegetal, el suelo, es el segundo después de los océanos en capturar el carbono atmosférico (Rojas et al., 2018) y el más grande depósito de carbono presente en la naturaleza (Vela et al., 2012).

El suelo es un recurso natural imprescindible para disminuir los efectos del cambio climático, por el rol estratégico que cumple mediante el ciclo de carbono en la tierra (Burbano, 2018); el carbono orgánico se encuentran almacenados en los suelos de manglares (Valdés et al., 2011; Núñez et al., 2021), humedales (Suárez, 2016; Ampuero & Aponte, 2020), bosques (Bojórquez et al., 2015; Anaya et al., 2016; Andrade et al., 2016; Galicia et al., 2016 y Retama et al., 2019), pasturas cultivadas (Andrade et al., 2016), páramo herbáceo (Ayala et al., 2014; Castañeda y Montes, 2017; Gutiérrez et al., 2019) y pajonales altoandinos (Quispe et al., 2015); como se puede apreciar, mayor número de estudios fueron realizados en suelos de bosques y pocos en suelos de pastos naturales altoandinos, aunque la mayor concentración de carbono orgánico en el suelo está presente en la región de los Andes comparado con la costa y la amazonia (Loayza et al., 2020).

Las actividades que modifican y revierten el proceso de almacenamiento de carbono del suelo son las prácticas agrícolas insostenibles (Baker et al., 2009) y la ganadería intensiva (Zamora et al., 2019); estas actividades afectan el contenido del carbono presente en el suelo,

convirtiéndose en una fuente significativa de emisión de gases de efecto invernadero (Bojórquez et al., 2015), a este problema se suma la erosión eólica e hídrica y la explotación de suelos orgánicos.

Los ecosistemas de pastizal andinos, en el Perú constituyen aproximadamente el 13,04% del territorio nacional (16'869,100.91 ha), que según el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (MINAM, 2019), comprende el Pajonal de puna seca, (4'887,186.88 ha) y el Pajonal de puna húmeda (11'981,914.03 ha). Siendo los pastos naturales altoandinos un potencial para la mitigación de la problemática de los gases de efecto invernadero a nivel nacional, no es considerado en su amplitud en el proceso de captura y almacenamiento de carbono, por lo que, la acumulación de carbono orgánico en el suelo de estos ecosistemas, requieren ser estudiados con mayor interés. En los estudios realizados a la actualidad, solo se reportan datos sobre el contenido de carbono en la biomasa aérea y radicular de pastos naturales altoandinos (Quispe et al., 2015) y de pajonales de páramo (Oliva et al., 2017); sin embargo, diversas investigaciones en otras latitudes afirman, que los suelos con cobertura de pastos naturales representan las mayores tasas en acumulación de carbono orgánico, en comparación con bosques y demás cultivos del mismo piso ecológico (Bojórquez et al., 2015; Suárez et al., 2016). También se considera a las regiones andinas y de alta montaña como los ecosistemas que muestran mayores contenidos de carbono orgánico en el suelo (Quiceno et al., 2016; Solano et al., 2018); es en este contexto que se plantea como objetivo del presente estudio, determinar la influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de pastos naturales altoandinos.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio está localizada en la cabecera de la microcuenca del Río Chumbao; situado en distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac, Perú, entre los 4000 a 4430 m.s.n.m., con una superficie aproximada de 250,16 ha (Figura 1).

2.2. Ecosistema del área de estudio

El área de estudio, de acuerdo al MINAM (2015), se reconoce como una ecorregión puna, perteneciente a la región andina, que se caracteriza por tener un bioclima húmedo, con cobertura vegetal de formación herbazal con extensos pastizales, la fisiografía es característica de montaña alta, su piso ecológico se clasifica en altimontano por su fisonomía de vegetación, distribución geográfica de especies vegetales y animales, biodiversidad, los suelos y el clima; su ecosistema se clasifica en pajonal de puna húmeda, con cobertura vegetal de pajonal andino; presenta bofedales, situados en terrazas pluviales, depresiones superficies planas y ligeramente inclinadas, cuya principal alimentación son las precipitaciones pluviales, que forma parte de un ecosistema hidromórfico distribuido en esta región altoandina, este tipo de ecosistema, favorece a la formación de materia orgánica, la retención e infiltración de agua, cuya importancia radica en la formación de reservas de carbono y la provisión del recurso hídrico.

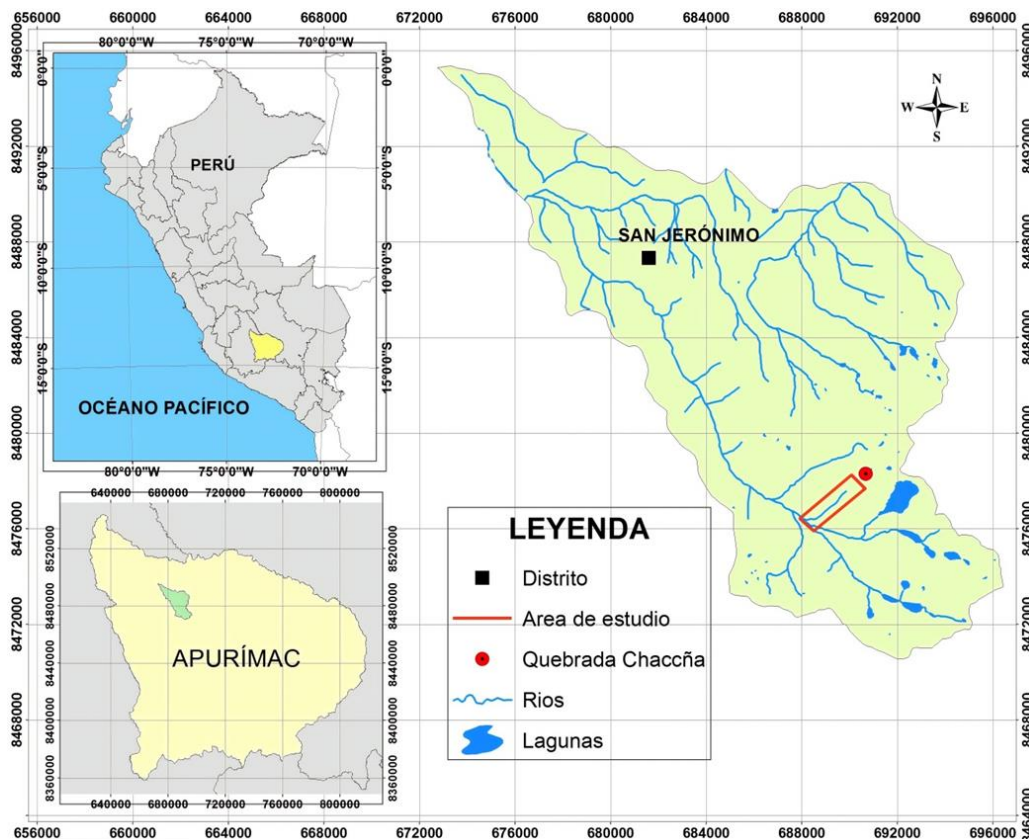


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

De acuerdo a los datos obtenidos de la estación meteorológica, ubicada a 4444 m.s.n.m.; se registró una humedad relativa media de 90,86% que osciló entre 26,2% a 100%; la temperatura media fue de 4,85 °C, se registró una temperatura mínima de -0,09 °C y máxima de 14,94 °C; la radiación solar varió entre 2 W/m² a 1279 W/m² con una media de 374,58 W/m²; las precipitaciones registraron una media de 0,05 litros por m²; la velocidad del viento registro un máximo de 14,6 m/s, cuya dirección presenta un rotación de 108° a 228° grados, la temperatura ambiente fluctuó entre 2,6 °C a 5,7 °C.

2.3. Muestreo

El proceso de selección y recolección de muestras del suelo, de los pastos naturales *Stipa ichu*, *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum*, se realizó previa caracterización de homogeneidad en altura, diámetro, coloración, daños físicos, de cada especie. Se determinó 73 puntos de muestreo (Tabla 1), en cada punto se extrajeron muestras de 3 kg a una profundidad de 0,2 m, a una frecuencia de muestreo de 16, 24 y 33 para cada especie respectivamente, y un trayecto incremental aproximado de la altitud entre los puntos de la línea de muestreo en campo de 25,0; 16,7 y 12,1, distribuido a lo largo de la gradiente comprendida entre los 4000 m.s.n.m. y 4410 m.s.n.m. En el proceso, se registró la temperatura del suelo, así como la altitud correspondiente en cada punto de muestreo. El muestreo se obtuvo mediante el método probabilístico estratificado por especies, a 0,95 de nivel de confianza y 0,05 del nivel de significancia.

Tabla 1

Determinación estratificada de muestras

Pastos naturales altoandinos	Unidad/ha	N° muestras
<i>Stipa ichu</i>	8000	16
<i>Festuca dolichophylla</i>	12000	24
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	16000	33
Total	-	73

2.4. Análisis fisicoquímicos

El carbono orgánico del suelo, se determinó mediante el método de oxidación planteado por (Walkley y Black, 1934); para cada punto de muestreo se pesó 0,5 g de suelo en base seca, tamizado a 0,5 mm, se procedió a mezclar con 10 ml de dicromato de potasio en un matraz Erlenmeyer (500 ml), se agregó a la mezcla 20 ml de H₂SO₄ (ácido sulfúrico concentrado), se dejó reposar durante 30 min, luego se añadió 200 ml de agua destilada, 5 ml de H₃PO₄ (ácido fosfórico concentrado), después se adicionó de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina, para finalizar se realizó a titulación con una disolución de sulfato ferroso hasta obtener el color verde claro. Para calcular el % de COS fácilmente oxidable, se empleó la siguiente ecuación:

$$\% CO = \left(\frac{B - T}{g} \right) (N)(0,39)(mcf)$$

Dónde B: Volumen de sulfato ferroso para evaluar el blanco de reactivos (ml); T: Volumen de sulfato ferroso para evaluar la muestra (ml); N: Normalidad puntual del sulfato ferroso; g: Peso de la muestra (g); mcf: Factor de corrección de humedad.

Tabla 2
COS según altitud y especie

Punto de muestreo	Altitud	Especie	COS (t/ha)	Punto de muestreo	Altitud	Especie	COS (t/ha)	Punto de muestreo	Altitud	Especie	COS (t/ha)
1	4000,0	SI	302,38	26	4142,7	CV	293,78	51	4285,2	CV	401,97
2	4006,0	FD	298,44	27	4148,4	CV	347,47	52	4290,9	SI	431,71
3	4012,0	CV	308,13	28	4154,1	FD	326,53	53	4296,6	FD	414,87
4	4017,0	FD	292,13	29	4159,8	SI	316,11	54	4302,3	CV	418,76
5	4023,0	CV	318,67	30	4165,5	CV	325,56	55	4308,0	FD	440,56
6	4028,7	SI	310,01	31	4171,2	FD	345,44	56	4313,7	SI	439,57
7	4034,4	CV	312,03	32	4176,9	CV	327,57	57	4319,4	CV	442,31
8	4040,1	FD	309,10	33	4182,6	SI	334,73	58	4325,1	CV	449,59
9	4045,8	CV	329,23	34	4188,3	FD	344,54	59	4330,8	FD	475,73
10	4051,5	FD	328,06	35	4194	CV	343,74	60	4336,5	CV	471,22
11	4057,2	SI	325,67	36	4199,7	CV	338,24	61	4342,2	SI	448,53
12	4062,9	CV	326,10	37	4205,4	FD	375,74	62	4347,9	FD	434,05
13	4068,6	FD	316,04	38	4211,1	SI	378,25	63	4353,6	CV	408,84
14	4074,3	CV	320,59	39	4216,8	CV	385,08	64	4359,3	FD	436,38
15	4080,0	SI	336,35	40	4222,5	CV	387,41	65	4365,0	SI	413,52
16	4085,7	FD	337,41	41	4228,2	FD	380,56	66	4370,7	CV	401,16
17	4091,4	CV	332,56	42	4233,9	SI	362,97	67	4376,4	CV	390,06
18	4097,1	CV	325,01	43	4239,6	CV	383,76	68	4382,1	FD	384,06
19	4102,8	FD	336,29	44	4245,3	CV	373,68	69	4387,8	CV	401,39
20	4108,5	SI	321,95	45	4251	CV	371,10	70	4393,5	SI	446,80
21	4114,2	CV	289,45	46	4256,7	FD	365,56	71	4399,2	FD	396,05
22	4119,9	FD	322,03	47	4262,4	SI	377,89	72	4404,9	CV	349,61
23	4125,6	CV	336,99	48	4268,1	CV	381,60	73	4410,6	FD	384,90
24	4131,3	SI	296,20	49	4273,8	CV	397,71				
25	4137,0	FD	322,83	50	4279,5	FD	395,87				

SI: Stipa ichu, CV: Calamagrostis vicunarum, FD: Festuca dolichophylla.

La transformación del carbono orgánico del suelo a materia orgánica se realizó aplicando la fórmula: % MO = (% COS) (1,724).

El método de oxidación detecta el carbono orgánico entre un 70% - 84%, siendo necesario emplear un factor de corrección, el cual varía en relación a la estructura de los suelos. En este estudio se analizó el carbono orgánico del suelo (COS) fácilmente oxidable sin la aplicación del factor de corrección, puesto que, es necesario realizar investigaciones más puntuales con relación a las propiedades edáficas para obtener una cuantificación fiable.

La textura del suelo, se estableció mediante el método de hidrometría propuesto por (Bouyoucos, 1962), que determina la textura del suelo en base a la medición de la velocidad de sedimentación de las partículas dispersadas en agua; para determinar el % de arena, arcilla y limo, se tamizó las muestras de suelo seco a 2 mm, y se empleó 50 g de suelo por muestra; se mezcló el suelo con 10 ml de solución dispersante y agua, después de reposar, se sometió a dispersión durante 10 minutos; al suelo dispersado se añade agua hasta aforar la probeta (1000 ml), después de un proceso de agitación vertical se registra las lecturas del hidrómetro a 40 seg, y a 2 h. Las lecturas se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ de arena} = 100 - \frac{\text{Lectura a 40 seg}}{\text{Peso seco de la muestra(g)}}$$

$$\% \text{ de arcilla} = \frac{(\text{Lectura a 2 h}) \times 100}{\text{Peso seco de la muestra(g)}}$$

$$\% \text{ de limo} = 100 - (\% \text{ Arcilla} + \% \text{ Arena})$$

2.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el software de IDE R Studio, la prueba de hipótesis se desarrolló a través de la correlación de Pearson como prueba

estadística paramétrica, a un nivel de significancia del 95% (p < 0,05), que determina a través del valor del coeficiente de correlación r, el tipo y grado de relación entre las variables estudiadas respecto a la altitud; la influencia de la variabilidad altitudinal se determinó a través del coeficiente de determinación r², que evalúa la proporción de variación de la variable dependiente explicada por la variable independiente.

2.6. Análisis de correlación

Dado que, los datos del COS, altitud, así como las características físicas (humedad, temperatura, % de arena, % limo, % arcilla) son numéricos y por ende aleatorios desde su selección, y el análisis de normalidad realizado mediante la prueba de Kolmogorov Smirnov, con aplicación de la corrección de significancia propuesta por Lilliefors, sugieren la aceptación de la normalidad de los datos en estudio. Se consideró a la altitud como variable fija, que fue comparada con los contenidos de arena, limo, arcilla, temperatura y materia orgánica, para todos los puntos de muestreo y contenidos de COS por cada especie de pasto altoandino, posteriormente comprobada la existencia de correlación (p < 0,05) se determinó el grado de correlación mediante el coeficiente de correlación r, cuyo valor oscila entre -1 a 1, los valores negativos indican la existencia de una relación lineal inversa, mientras que un valor positivo denota la existencia de una relación lineal directa; si el coeficiente es igual o se aproxima a 0, no existe relación entre las variables. Para interpretar la magnitud se consideró los rangos 0,00 ≤ |r| < 0,10; 0,10 ≤ |r| < 0,30; 0,30 ≤ |r| < 0,50 y 0,50 ≤ |r| < 1,00, correspondiente a una correlación nula, débil, moderada y fuerte, respectivamente (Hernández et al., 2018).

Tabla 3
Comparación del almacenamiento de Carbono Orgánico del Suelo

Tipo	Altitud (msnm)	COS	Referencias
Manglares	5	0,006 – 0,25 %C	(Núñez et al., 2021)
Bosques	400-1016	0,48 – 5,07 t C/ha	(Retana et al., 2019)
Humedales	300	36,64 t C/ha	(Ampuero & Aponte, 2020)
	4000-5000	244,56 t C/ha	(Suárez et al., 2016)
Páramos	1200	46 t C/ha	(Solano et al., 2018)
	1800	80 t C/ha	(Solano et al., 2018)
	3200 - 3500	119 - 397 t C/ha	(Castañeda & Montes, 2017)
	4500	297,8 t C/ha	(Loayza et al., 2020)
	4000	337,98 t C/ha	(Gutiérrez et al., 2019)
	4000-4410	302 - 475,73 t C/ha	Resultados del presente estudio

Tabla 4
Correlación del COS con la variación de la altitud

Correlación entre:	r	Grado de relación	p	r ²
COS y altitud	0,84	Relación directa fuerte	2,20e-16	0,71

3. Resultados y discusión

3.1. Carbono orgánico del suelo

Se determinaron los niveles de COS teniendo en consideración la altitud y la especie de pasto natural según los puntos de muestreo (Tabla 2).

Los valores del carbono orgánico en el suelo estimados para los pastos altoandinos *Stipa ichu*, *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarium*, a lo largo de la gradiente altitudinal (4000 - 4410 m.s.n.m.), presentan una media y desviación estándar de 365,17 ± 55,13, 365,13 ± 49,99 y 363,34 ± 46,20 t ha⁻¹, respectivamente, siendo los valores mínimos observados de 296,20; 292,13 y 289,45 con valores máximos de 448,53; 475,73 y 471,22 t ha⁻¹, para cada especie. La media general fue de 364,33 ± 48,80 t ha⁻¹ (Tabla 3).

Los valores obtenidos en el presente estudio son superiores a los reportados por Castañeda & Montes (2017); Loayza et al. (2020) y Gutiérrez et al. (2019) en ecosistemas similares, donde evaluaron el carbono orgánico en el suelo de páramos altoandinos, los resultados no superan las 337,98 t ha⁻¹ de carbono orgánico; sin embargo Ayala et al. (2014) reporta 537,06 t ha⁻¹ a una profundidad de 0.6 m; estas diferencias están relacionadas con la densidad de la cobertura vegetal (Lei et al., 2018; Poeplau et al., 2020) y la profundidad de los suelos que presentan los ecosistemas (Duan et al., 2020). Los valores elevados de carbono orgánico terrestre se encontraron en zonas con mayor cobertura vegetal que aíslan el suelo de factores climáticos y la incidencia directa de radiación solar, lo que permite acumular mayor cantidad de carbono orgánico debido a una menor descomposición de materia orgánica; así mismo, la densidad de las raíces característica de estos vegetales permite almacenar el carbono orgánico en el suelo (Zimmermann et al., 2010; Ma et al., 2019; Hernández et al., 2021).

En la Figura 2 se puede apreciar que las especies de pastos altoandinos en estudio (*Stipa*, *Festuca* y *Calamagrostis*), no presentan diferencia significativa en la capacidad de almacenamiento de COS. Lo que indicaría que estas especies tienen similares capacidades de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo.

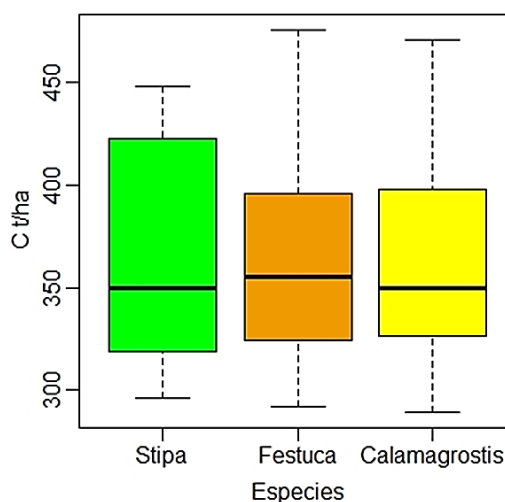


Figura 2. Comparación de la capacidad de almacenamiento de COS.

El coeficiente de correlación entre la altitud y la cantidad de COS (Tabla 4 y Figura 3a), fue de 0,84, lo que indica, que existe una relación lineal directa fuerte ($p < 0,001$), que demuestra, que según se incrementa la altitud también se incrementa el nivel de almacenamiento de COS ($r^2 = 0,71$).

Los resultados obtenidos concuerdan con los estudios de Solano et al. (2018), quienes también afirman que las reservas de carbono en ecosistemas de matorral son más altos a mayor altitud y más bajos a menor altitud, con una correlación positiva de 0,748. Para herbazales de zonas áridas, Pastor et al. (2015), reportan resultados similares, donde las reservas de carbono orgánico en el suelo incrementan su contenido a mayores altitudes, mostrando una correlación positiva $r = 0,77$.

3.2. Características del suelo

Se determinaron los valores de textura, temperatura y materia orgánica en cada punto de muestreo, para el conocimiento de las características del suelo en los ecosistemas en estudio (Tabla 5).

Tabla 5
Valores de textura, temperatura y materia orgánica del suelo

Punto muestreo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Punto muestreo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)
1	14,6	48,7	36,7	7,7	18,8	38	38,9	40,7	20,4	6,7	22,2
2	13,0	50,0	37,0	7,6	18,6	39	35,0	57,6	7,4	6,5	22,7
3	14,9	45,3	39,8	7,6	19,3	40	37,6	44,7	17,7	6,8	22,8
4	10,2	50,9	38,9	7,7	18,6	41	32,0	50,0	18,0	6,6	23,1
5	29,0	43,3	27,7	7,6	18,8	42	25,5	49,3	25,2	6,5	23,1
6	14,3	54,7	31,0	7,6	19,6	43	33,0	42,0	25,0	6,5	23,4
7	30,9	35,1	34,0	7,5	19,0	44	28,0	46,7	25,2	6,6	23,5
8	26,9	33,6	39,4	7,5	19,5	45	25,5	55,3	19,2	6,5	23,4
9	32,0	40,4	27,6	7,5	19,7	46	24,2	50,0	25,8	6,5	23,5
10	32,2	37,3	30,5	7,5	19,7	47	26,9	57,0	16,1	6,5	23,6
11	39,8	28,7	31,5	7,4	18,9	48	30,9	43,3	25,8	6,5	23,6
12	32,9	30,4	36,7	7,4	19,8	49	37,8	37,3	24,9	6,4	23,6
13	34,0	36,0	30,0	7,4	18,8	50	35,8	41,3	22,9	6,4	19,0
14	33,5	31,3	35,2	7,3	19,3	51	38,8	36,0	25,2	6,4	23,7
15	39,1	20,4	40,5	7,3	20,0	52	41,5	57,5	1,0	6,4	24,3
16	38,6	22,9	38,5	7,4	20,0	53	40,9	33,1	26,0	6,3	24,2
17	38,6	31,3	30,2	7,3	19,4	54	42,9	33,7	23,4	6,4	24,1
18	37,6	25,3	37,1	7,3	19,3	55	43,8	31,3	24,9	6,4	25,3
19	34,7	28,0	37,3	7,2	20,3	56	43,6	35,0	21,4	6,3	25,2
20	32,0	33,6	34,4	7,2	19,5	57	44,6	28,7	26,7	6,3	25,4
21	25,5	42,0	32,5	7,2	19,2	58	46,5	34,7	18,8	6,3	25,3
22	23,5	40,6	36,0	7,2	20,5	59	43,6	40,4	16,0	6,1	25,8
23	39,7	51,5	8,8	7,2	20,1	60	52,2	29,6	18,2	6,0	25,7
24	21,2	40,7	38,1	7,1	19,7	61	48,8	32,0	19,2	5,9	24,9
25	35,8	42,0	22,2	7,1	19,9	62	48,5	26,0	25,5	5,9	24,3
26	24,8	43,3	32,0	7,2	19,0	63	49,9	27,1	23,0	6,0	22,7
27	32,0	53,2	14,8	7,0	21,0	64	51,5	32,0	16,5	5,8	23,8
28	31,9	54,5	13,6	7,0	20,5	65	51,6	30,4	18,0	5,9	22,6
29	18,6	56,9	24,5	7,0	21,0	66	52,6	29,0	18,4	5,8	22,0
30	22,0	63,0	15,0	6,9	20,8	67	51,0	36,0	13,0	5,8	21,5
31	25,5	58,0	16,5	6,9	21,7	68	52,5	37,0	10,5	5,8	21,0
32	22,5	56,0	21,5	6,9	21,1	69	58,0	38,0	4,0	5,7	21,1
33	23,5	59,0	17,5	6,8	21,3	70	57,0	32,6	10,4	5,7	24,0
34	24,8	50,7	24,5	6,8	22,0	71	54,2	38,4	7,4	5,6	21,6
35	20,8	59,3	20,0	6,8	22,3	72	58,0	29,6	12,4	5,6	18,7
36	24,0	59,0	17,0	6,8	21,5	73	59,0	28,6	12,4	5,6	20,5
37	38,9	51,5	9,6	6,8	21,7						

Los promedios y desviación estándar obtenidos en la evaluación del suelo, a lo largo de la gradiente altitudinal a 0.2 m de profundidad, fueron: 35,3 ± 11,94 % de arena; 41,1 ± 10,73 % de limo; 23,6 ± 9,64 % de arcilla, con 6,7 ± 0,61 °C de temperatura y 21,6 ± 2,13 % de materia orgánica (Tabla 5). Estos valores caracterizan los suelos del área de estudios.

Con los resultados del análisis de correlación entre las características del suelo y la cantidad de carbono orgánico que se almacena en el suelo (Tabla 6), se pretende conocer la influencia que tiene cada característica del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico.

Los resultados del análisis de correlación (Tabla 6 y Figura 3b) indican que a mayor porcentaje de arena existe mayor acumulación de CO en los suelos de los pastos naturales altoandinos ($r^2 = 0,53$); no ocurre lo mismo con los componentes limo y arcilla (Tabla 6 y Figuras 3c y 3d), donde a mayor porcentaje de limo y arcilla ($r^2 = -0,54$), se obtiene menor acumulación de carbono orgánico en los suelos, en el caso del limo los resultados no son significativos ($r^2 = 0,08$). Similares resultados fueron

reportados por Čirić et al. (2013) y Angon (2021), quienes refieren que se obtiene mayor concentración de COS cuando menor es el porcentaje de arena y mayor las fracciones de limo y arcilla, siendo estos componentes texturales, factores que influyen en las concentraciones de carbono orgánico terrestre (Ledo et al., 2020). Paz et al. (2014), señalan que la relación entre fracciones del suelo con el carbono se mantiene estable, independientemente de las condiciones de equilibrio o no y del tamaño de las fracciones del suelo.

En cuanto a la relación temperatura y el carbono orgánico del suelo (Tabla 6 y Figura 3e), existe una relación inversa fuerte, lo que indica que a menor temperatura del suelo existe mayor acumulación de COS ($r^2 = 0,70$). Los resultados obtenidos concuerdan con las apreciaciones de Solano et al., (2018), quienes indican que la variación en las reservas de carbono en el suelo está relacionada principalmente con la disminución de la temperatura (Hunt et al., 2020) y que es confirmada por Luo et al. (2017) y Quesada et al. (2020), que afirman que uno de los factores que controlan la descomposición de la materia orgánica es la temperatura del suelo.

Tabla 6

Coefficientes de correlación y determinación entre las características del suelo y el COS

Correlación entre:	p	r	Grado de relación
Arena y COS	7,322e-13	0,72	Relación directa fuerte
Limo y COS	0,01105	-0,30	Relación inversa débil
Arcilla y COS	2,311e-07	-0,56	Relación inversa fuerte
Temperatura y COS	2,20e-16	-0,82	Relación inversa fuerte
Materia orgánica y COS	2,20e-16	0,91	Relación directa fuerte

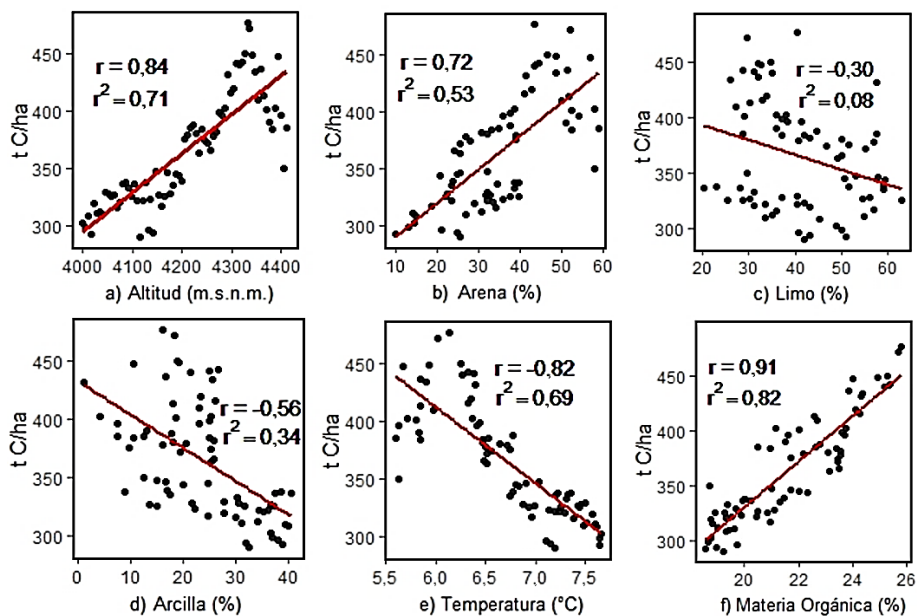


Figura 3. Coeficientes de correlación y determinación entre acumulación de COS y: a) altitud; b) arena; c) limo; d) arcilla; e) temperatura y f) materia orgánica.

En cuanto a la relación de la materia orgánica y el carbono orgánico del suelo (Tabla 6 y Figura 3f), existe una relación directa fuerte, lo que indica que a mayor concentración de materia orgánica se presenta mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo ($r^2 = 0,82$). La máxima capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo requiere de mayor incorporación de materia orgánica, que, en términos dinámicos, al menos el 13% del carbono orgánico del suelo total es lábil y se perderá cuando el suelo reduzca la cobertura vegetal (Paz et al., 2016) y se produzca cambios en los factores ambientales (Bell et al., 2021).

4. Conclusiones

La capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de los pastos naturales altoandinos está influenciada por la gradiente altitudinal y la temperatura del suelo. A medida que se incrementa la altitud, el suelo presenta mayor capacidad de almacenamiento de carbono orgánico. El contenido de arena y arcilla en la estructura del suelo de los pastos naturales altoandinos, son factores que influyen en el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo; así como la temperatura y materia orgánica, el primero que regula los niveles de acumulación de la segunda, propiciando la formación de la capa superficial del suelo del pastizal.

Por otro lado, los valores medios de carbono orgánico de los pastos naturales *Stipa ichu*, *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarium*, no presentan diferencia significativa, por lo que, la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de estas especies es similar. Conocer la contribución de los pastos naturales altoandinos en la captura del carbono bajo diferentes condiciones, permitirá mejorar las condiciones de conservación. Es necesario promover la restauración de los pastizales degradados, a través de técnicas no invasivas, que eviten la pérdida de las reservas de carbono orgánico del suelo y la biomasa, para contribuir de manera efectiva en la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero y los efectos del calentamiento global; a la vez que, se estaría mejorando de la capacidad de almacenamiento e infiltración del agua en estos ecosistemas.

Agradecimientos

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) y al Banco Mundial (BM), por el financiamiento, en el marco de la ejecución del subproyecto con Registro No: 59861.

ORCID

- M. L. Huamán-Carrión <http://orcid.org/0000-0001-5139-9064>
- F. Espinoza-Montes <http://orcid.org/0000-0002-0093-7050>
- A. I. Barrial-Luján <http://orcid.org/0000-0002-2982-6354>
- Y. Ponce-Atencio <http://orcid.org/0000-0003-4379-4341>

Referencias bibliográficas

- Ampuero, W., & Aponte, H. (2020). Estimación del carbono almacenado en un juncal de *Schoenoplectus americanus* en el humedal costero Los Pantanos de Villa (Lima - Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 267-282.
- Anaya, C., Mendoza, M., Rivera, M., Páez, R., & Olivares, D. (2016). Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México. *Agrociencia*, 50(2), 251-269.
- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Rojas, A. S. (2016). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 233-241.
- Angon, D. (2021). Influence of trees and associated variables on soil organic carbon: a review. *Journal of Ecology and Environment*, 45, 5.
- Ayala, L., Villa, M., Aguirre, Z., & Aguirre, N. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. *Cedamaz*, 4(1), 45-52.
- Baker, C. J., Reicosky, D. C., Saxton, K. E., Ribeiro, M. f., Hobbs, P. R., et al. (2009). *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación* (Primera ed.). España: Editorial Acribia. doi:978-84-200-1129-5
- Bell, S. M., Terrer, C., Barriocanal, C., Jackson, R. B., & Rosell, A. (2021). Soil organic carbon accumulation rates on Mediterranean abandoned agricultural lands. *Science of the Total Environment*, 759, 143535.
- Bojórquez, J. I., Castillo, L. A., Hernández, A., García, J. D., & Madueño, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 63-69.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Método de hidrómetro mejorado para realizar análisis de tamaño de partícula de suelos. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.
- Burbano, H. I. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de ciencias Agrícolas*, 34(1), 82-96.
- Castañeda, A. E., & Montes, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210-221.
- Čirić, V., Manojlović, M., Belić, M., Nešić, L., & Šeremešić, S. (2013). Effects of land use conversion on soil aggregate stability and organic carbon in different soils. *Agrociencia*, 47(6), 539-552.
- Duan, L., Li, Z., Xie, H., Yuan, H., Li, Z., & Zhou, Q. (2020). Regional pattern of soil organic carbon density and its influence on the plow layers of croplands. *Land degradation development*, 31(16), 2461-2474.
- Galicia, L., Gamboa, G. C., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña, V., et al. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Ginebra, M., Rodríguez, M., Calero, B., Ponce de León, D., & Font, L. (2015). Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*, 36(3), 67-70.
- Gutiérrez, J., Ordoñez, N., Bolívar, A., Bunning, S., Guevara, M., et al. (2019). Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(1), 1855.
- Hernández, J. D., Espinosa, J. F., Peñalosa, M. E., Rodríguez, J. E., Chacón, J. G., et al. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37, 587-595.
- Hernández Núñez, H. E., Andrade, H., Suárez Salazar, J. C., Sánchez, J., Gutiérrez, D., & Gutiérrez García, G. A. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(1), 252-368.
- Hunt, J., Celestina, C., & Kirkegaard, J. (2020). The realities of climate change, conservation agriculture, and soil carbon sequestration. *Global Change Biology*, 26(6), 3188-3189.
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente, J., et al. (2020). Changes in soil organic carbon in perennial crops. *Global change biology*, 26(7), 4158-4168.
- Lei, P., Liu, S., Ye, Y., Zhang, W., Wang, K., & Su, Y. (2018). Effects of environmental factors on soil organic carbon under restoration of natural or managed vegetation. *Global Change Biology*, 29(3), 387-397.
- Loayza, N., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., et al. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(2), 1852.
- Luo, Z., Feng, Y., Luo, Y., Baldock, J., & Wang, E. (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 23(10), 4430-4439.
- Ma, T., Dai, G., Zhu, S., Chen, D., Chen, L., et al. (2019). Distribution and preservation of carbon components derived from roots and shoots in soils in the grasslands of China and Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(2), 420-431.
- Martínez, H. E., Fuentes, E. J. P., & Acevedo, H. E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Guía de inventario de la flora y vegetación*. Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. Lima: MINAM. 49 p.
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú-Memoria descriptiva*. En <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- Núñez, F., Ugas, M., Calderón, R., & Rivas, F. (2021). Cuantificación del carbono orgánico y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, laguna de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 66(1), 371-398.
- Oliva, M., Pérez, R., Robert, R., Gamarra, O., Leiva, S., et al. (2017). Cuantificación del área de pajonal de las microcuencas de Gocta y Chinata y su potencial como reserva de carbono. *8(3)*, 233-241.
- Olivo, M. D., & Soto, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 14(57), 221-230.
- Pastor, J., Rivas, W., Martínez, A., Campos, Y., & Márquez, E. (2015). Carbono orgánico del suelo en un gradiente altitudinal en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Multiciencias*, 15, 271-280.
- Paz, F., Covaleda, S., & Etchevers, B. J. D. (2014). Organic Carbon Distribution on Different Particle Sizes of Soil: Simple Linear Kinetic Model. *Terra Latinoamericana*, 32(2), 127-142.
- Paz, F., Covaleda, S., Hidalgo, C., Etchevers, J., & Matus, F. (2016). Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 321-337.
- Poehlau, C., Jacobs, A., Don, A., Vos, C., Schenieder, F., et al. (2020). Organic carbon stocks in German agricultural soils: key results of the first comprehensive inventory. *Global Change Biology*, 183(6), 665-681.
- Power, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *Ingeniería Industrial*, 27, 101-122.
- Quesada, C. A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Lawrence Phillips, O., Saiz, G., & Lloyd, J. (2020). Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *Soil*, 6, 53-88.
- Quiceno, N. J., Tangarife, G. M., & Álvarez, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul* 43, 171-202.
- Quispe, C. M., Quispe, F., & Yarangá, R. M. (2015). Carbon storage in natural pastures of the Canipaco subbasin, Huancayo. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(2), 228-227.
- Retana, L., Méndez, A. L., Sánchez, H., Montero, W., Barquero, A. I., & Hernández, L. G. (2019). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un bosque primario intervenido de la zona protectora "El Rodeo", Costa Rica. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(3), 341-353.
- Rojas, A. S., Andrade, H. J., & Segura, M. (2018). Los suelos del paisaje altoandino de Santa Isabel (Tolima, Colombia) ¿Son sumideros de carbono orgánico? *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 27(1), 51-59.
- Saynes, V., Etchevers, J. D., Paz, F., & Alvarado, L. O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- Solano, M., Ramón, P., Burneo, J. I., Quichimbo, P., & Jiménes, L. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas de carbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 27(3), 116-122.
- Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171-177.
- Useros, J. L. (2013). El cambio climático sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.
- Valdés, E., Valdez, J. I., Ordez, V. M., Gallardo, J. F., Nieto, J. P., & Ayala, C. (2011). Evaluación del carbono orgánico en suelos de los manglares de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(8), 47-58.
- Valenzuela, I. G., & Visconti, E. F. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 12(1), 233-243.
- Vela, G., López, J., & Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas*, 77, 18-30.
- Walkley, A., & Black, A. I. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Zamora, B. P., Mendoza, M., Sangerman, D. M., Quevedo, A., & Navarro Bravo, A. (2019). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(1), 155-164.
- Zimmermann, M., Miles R. Silman, P. M., Fedders, A., Gibbon, A., et al. (2010). No hay diferencias en las reservas de carbono del suelo a lo largo de la línea de árboles en los Andes peruanos. *Ecosystems*, 13, 62-74.