



# Propiedades de suelos distribuidos en un transecto longitudinal del Sur de Chile

## Soil properties distributed along a longitudinal transect of Southern Chile

Zúñiga, F.<sup>a,b\*</sup>, Leiva, C.<sup>c</sup>, Rivano, F.<sup>c</sup>, San Martín, M.<sup>c</sup>, Toledo, P.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Bosques y Sociedad, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile.

<sup>b</sup> Centro de Investigación en Suelos Volcánicos, Universidad Austral de Chile.

<sup>c</sup> Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 12-01-2024

Accepted 27-06-2024

#### Keywords:

Altitudinal gradient

Carbon stock

Andisols

#### Short communication

Soil Science

#### \*Corresponding author:

Felipe Zúñiga U.

E-mail address:

[fzuniga@uach.cl](mailto:fzuniga@uach.cl)

### ABSTRACT

Changes in climatic, topographic, and vegetational conditions can be detected through soil transects. This study surveys the variation of soil properties along a longitudinal transect. Soil samples were collected at five sites distributed between Coñaripe (A) and Mehuín (E) in the Los Ríos region. Properties such as: i) bulk density ( $\rho_b$ ), ii) soil organic carbon (COS), iii) extractable Al ( $Al_a$ ) and iv) pH were determined; in addition, the C stock was calculated. Correlation (r-Pearson) and simple regression analyses were performed between soil properties. The relationship between pH and COS was inverse ( $r = -0.86$ ) and direct between  $Al_a$  and  $\rho_b$  ( $r = 0.83$ ) but did not imply causality. Soil C accumulation function increased from the Andean foothills towards the Intermediate Depression, reaching its maximum in the Pelchuquín soil series (Eutric Fulvudand).

### RESUMEN

Los cambios en la condición climática, topográfica y vegetacional pueden ser detectados a través de los transectos de suelo. Esta comunicación explora la variación de propiedades del suelo en un transecto longitudinal. Se colectaron muestras de suelo en 5 sitios distribuidos entre Coñaripe (A) y Mehuín (E) en la región de Los Ríos. Se determinaron propiedades como: i) densidad aparente ( $\rho_b$ ), ii) carbono orgánico del suelo (COS), iii) Al extractable ( $Al_a$ ) y iv) pH; además se calculó el stock de C. Se realizaron análisis de correlación (r-Pearson) y regresión simple entre las propiedades de los suelos. La relación entre pH y COS fue inversa ( $r = -0,86$ ) y directa entre  $Al_a$  y  $\rho_b$  ( $r = 0,83$ ) pero no implicó causalidad. La función de acumulación de C en el suelo aumentó desde la precordillera de Los Andes hacia la Depresión Intermedia, alcanzando su máximo en la serie de suelo Pelchuquín (Eutric Fulvudand).

**Palabras clave:** Gradiente altitudinal, Stock de carbono, Andisols

### INTRODUCCIÓN

La geografía de Chile permite una serie de actividades económicas a través de todo el país. Concretamente, en la región de los Ríos, destacan actividades como agricultura, ganadería y la industria forestal (INE, 2022). En esta región se concentra un 10 % de los volcanes de Chile (Zúñiga et al., 2019), dando origen a una gran variedad de suelos derivados de materiales volcánicos. Estos suelos constituyen cerca del 1 % de los suelos del mundo, pero en Chile representan un 60 % de la superficie arable (Dahlgren et al.,

2004; Besoán, 1985) y se distribuyen entre los 36° LS y los 42° LS (Matus et al., 2006). Los cambios en condiciones climáticas, topográficas, en uso del suelo y en la dinámica vegetacional en ecosistemas terrestres pueden ser detectados a través de transectos a gran escala (Kock et al., 1995; Caddy-Retalic et al., 2017). En Chile, el estudio de las propiedades de los suelos a través de transectos latitudinales es habitual (Doetterl et al., 2015; Fleige et al., 2016; Bachmann et al., 2020), no obstante, el estudio de transectos longitudinales ha sido menos frecuente (Beinroth et al., 1985; Vera-Peters et al., 2022). El objetivo de esta comunicación

corta es prospectar la variación de algunas propiedades físicas y químicas de suelos en un transecto longitudinal en la región de Los Ríos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Suelos del transecto

En la región de Los Ríos, se realizó un transecto longitudinal (Precordillera de los Andes a Cordillera de la Costa) desde Coñaripe (39° 34' S, 72° 01' O) hasta Mehuín (39° 26' S, 73° 11' O). En el transecto, se muestrearon 5 puntos indicados en la Figura 1, mientras que dos de los perfiles de suelos observados se presentan en la Figura 2. La información de cada uno de los sitios presentada a continuación se complementó con el Estudio Agrológico X Región de CIREN (2003).

**A-Coñaripe:** Corresponde a un suelo profundo desarrollado a partir de material volcánico depositado en la precordillera de Los Andes en zonas de pendientes ligeramente onduladas (15-20 %). Presenta una textura franco arenosa fina y de coloración oscura, lo que se evidencia en el horizonte superficial melánico. En profundidad aparece pumicita altamente meteorizada (Figura 2, izquierda) y de un comportamiento tixotrópico. Es muy probable que el suelo corresponda a un Acrudoxic Hapludand asociado a la serie Liquiñe el que se observó en un corte de camino de la ruta 201.

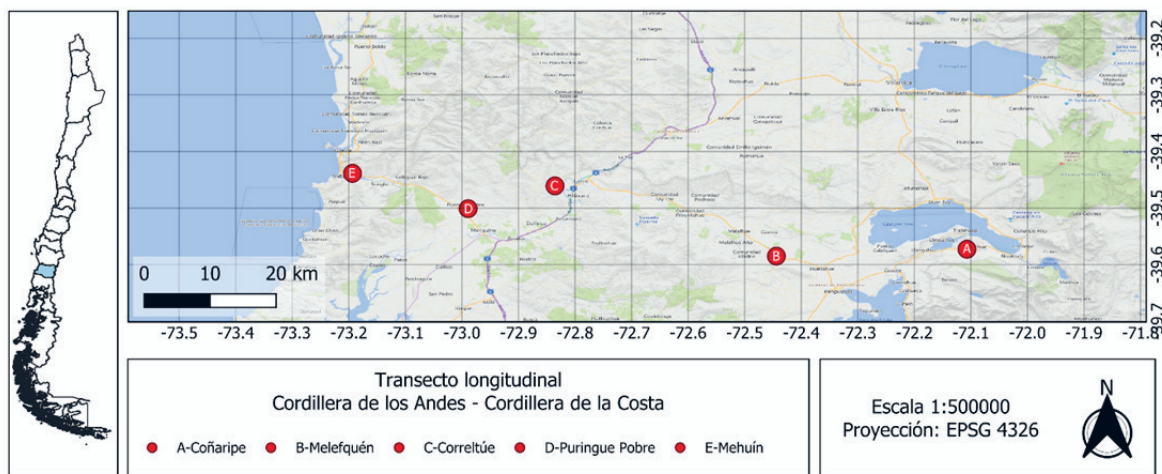
**B-Melefquén:** corresponde a un suelo tipo Ñadi, de origen sedimentario, ligeramente profundo (60 cm) formado por ceniza volcánica depositada sobre materiales fluvio-glaciares de diverso tamaño y mal sor-

teado que le otorga un drenaje restringido (Figura 2, derecha). La textura predominante es franco limosa y su coloración varía de pardo rojiza oscura a pardo oscuro. Se asocia a la serie Lanco y se clasifica como un Typic Durudand. Su uso actual es una pradera para ganadería de engorda.

**C-Correltúe:** Suelo profundo derivado de materiales volcánicos depositados sobre el complejo metamórfico de Cordillera de la Costa. Posee textura franco limosa en superficie y se torna más arcilloso en profundidad, presentando un horizonte Bt. Poseen un buen drenaje y se asocia a pendientes entre 30 y 50 %. El uso actual corresponde a una plantación de Eucalipto y se clasifica como un Andic Palehumult, serie Correltúe.

**D-Puringue Pobre:** Suelo profundo desarrollado por la depositación de cenizas volcánicas sobre canchagua. Estos suelos se asocian a la depresión de San José y su topografía varía entre 1 a 3 % con un buen drenaje. Su textura es franco limosa, y varía de colores pardos a pardo oscuro. Mineralógicamente se compone de material amorfo, gibbsita y trazas de vermiculita (Beinroth *et al.*, 1985). El uso actual es pastoreo de ganadería lechera. Se clasifica como un Eutric Fulvudand, serie Pelchuquín.

**E-Mehuín:** Corresponde a un suelo de terraza aluvial asociada al río Mehuín. Son terrenos con topografía plana y ligeramente cóncava. Poseen un nivel freático cercano a la superficie durante todo el año lo que favorece el desarrollo de vegetación hidromórfica. El suelo es profundo y de sensación limosa al tacto por la acu-



**Figura 1.** Transecto longitudinal en región de Los Ríos. Los puntos rojos corresponden a los sitios muestreados. De este a oeste: Coñaripe (A), Melefquén (B), Correltúe (C), Puringue Pobre (D) y Mehuín (E).

**Figure 1.** Longitudinal transect in the Los Ríos region. The red points correspond to the sampled sites. From east to west: Coñaripe (A), Melefquén (B), Correltúe (C), Puringue Pobre (D) and Mehuín (E).

mulación de material orgánico, conforme incrementa en profundidad se torna de una textura arenosa fina. El uso del suelo actual es un humedal, aunque se evidencia intervención por pastoreo bovino esporádico. Este suelo se considera un misceláneo pantano, y podría estar asociado a un tipo de suelo Inceptisol.

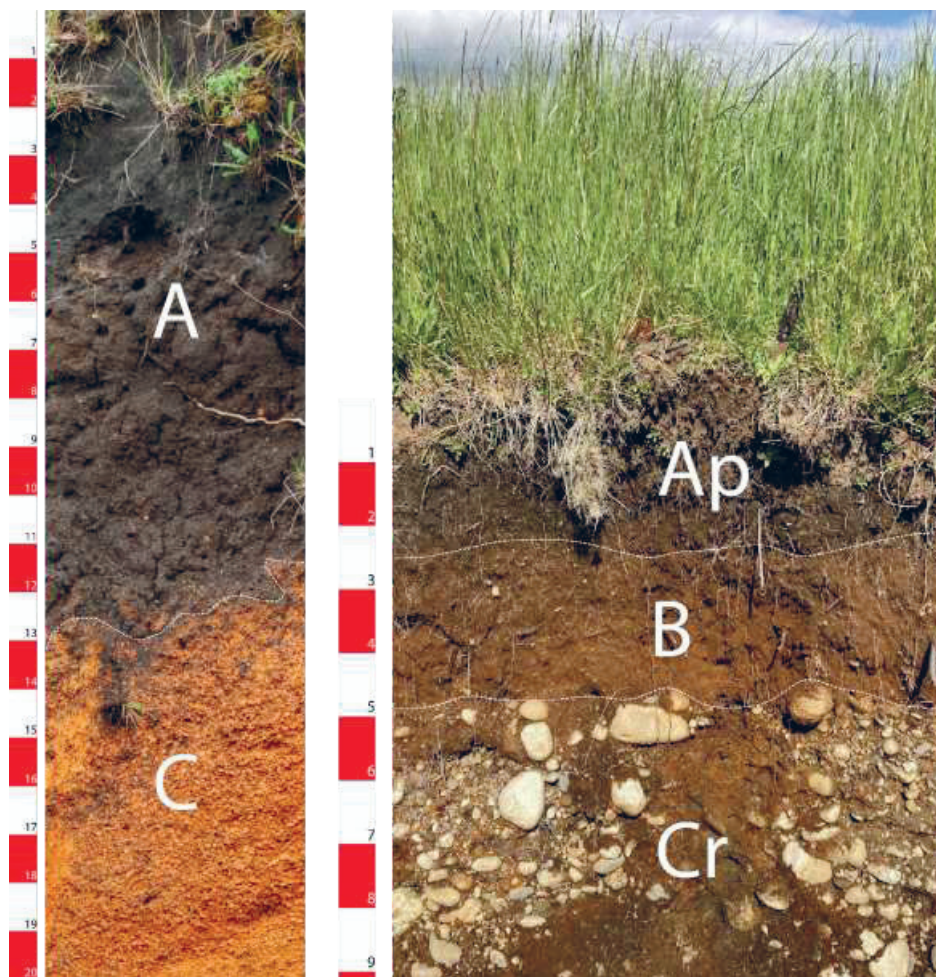
### Muestreo

En cada uno de los puntos se tomaron tres muestras no disturbadas de suelo en cilindros metálicos de 100 cm<sup>3</sup> de volumen (d = 5,5 cm; h = 4 cm). Los cilindros fueron cerrados y sellados con film plástico, para evitar alguna perturbación mecánica o pérdida de humedad que luego afectara la medición en laboratorio. También, se extrajeron muestras disturbadas de suelo (≈ 500 g) en bolsas plásticas, que fueron rotuladas para posteriormente ser analizadas en el laboratorio.

### Análisis de laboratorio

Las muestras no disturbadas se utilizaron para determinar la densidad aparente ( $\rho_b$ ) del suelo luego de secado en horno a 105 °C por 24 h (Sandoval *et al.*, 2012). Las muestras disturbadas fueron tamizadas (< 2 mm) y dejadas en bandejas plásticas a temperatura ambiente (25 °C). Posteriormente, se determinó el pH al agua (1:2,5) utilizando un potenciómetro (HANNA HI 9126 portable pH/ORP meter), el contenido de carbono orgánico (COS) utilizando método de análisis de oxidación húmeda de Walkley y Black (1934) y el aluminio extractable ( $Al_a$ ) con una solución de acetato de amonio 1M a pH 4,8 (Sadzawka *et al.*, 2006). La concentración de  $Al_a$  se determinó a través de espectrofotometría de absorción atómica (Unicam AAS Solaar 969 MK II).

También se calculó el stock de C del suelo para los primeros 20 cm utilizando el COS y  $\rho_b$  utilizando la si-



**Figura 2.** Epipedón melánico (A) y pumicita (C) en perfil de suelo Coñaripe (izquierda). Horizonte de laboreo (Ap) y sustrato fluvioglacial (Cr) en perfil de suelo Melefquén (derecha). Números arábigos indican profundidad en decímetros (dm).

**Figure 2.** Melanic epipedon (A) and pumicite (C) in Coñaripe soil profile (left). Tilling horizon (Ap) and fluvioglacial substrate (Cr) in Melefquén soil profile (right). Arabic numerals indicate depth in decimetres (dm).



guiente ecuación:

$$Stock\ C = COS * \rho_b * z$$

Donde:

Stock C: Almacén de carbono del suelo [Mg C ha<sup>-1</sup>] | COS: Carbono orgánico del suelo [%] |  $\rho_b$ : Densidad aparente [g cm<sup>-3</sup>] | z: Profundidad del suelo [cm].

### Análisis estadísticos

Con los datos obtenidos se realizó un análisis descriptivo de los datos y una matriz de correlación de Pearson para determinar la significancia de la relación entre las variables evaluadas. Posteriormente se confeccionaron análisis de regresión lineal para explorar funciones de pedotransferencia entre los suelos. Estos análisis se realizaron con el programa GraphPad Prism versión 10.1.0.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos del transecto presentan características de suelos derivados de materiales volcánicos, lo que es esperable para las condiciones climáticas de la región de Los Ríos (Casanova et al., 2013). En promedio, los suelos poseen un pH ligeramente ácido (5,8) lo que se asocia a los altos niveles de aluminio extractable ( $Al_a = 1841\text{ mg kg}^{-1}$ ) y carbono orgánico del suelo ( $COS \geq 8,8\%$ ), es decir a la reactividad de la fracción coloidal (Cuadro 1). Clunes et al. (2020) han determinado en

suelos de diferente mineralogía que el contenido de  $Al_a$  determina la retención de compuestos orgánicos es decir la capacidad de adsorción del suelo. En ese contexto, suelos dominados por mineralogía amorfa (i.e., alofán e imogolita) presentan mayores niveles de  $Al_a$  y COS. Los valores de densidad aparente ( $\rho_b$ ) de los suelos de transecto variaron entre  $0,19\text{ g cm}^{-3}$  y  $0,82\text{ g cm}^{-3}$ , por lo que cumplen con el criterio ándico de poseer valores de  $\rho_b \leq 0,9\text{ g cm}^{-3}$  (Soil Survey Staff, 2014).

### Propiedades de los suelos de la gradiente

Las propiedades de los suelos del transecto que presentaron una correlación significativa fueron el pH con COS ( $r = -0,86$ ) y el  $Al_a$  con  $\rho_b$  ( $r = 0,83$ , Cuadro 1). Con estos resultados se construyeron regresiones lineales simples que han sido utilizadas como funciones de pedotransferencia para estos suelos a una escala de transecto (Padarian et al., 2018). A medida que el contenido de COS aumenta el pH del suelo disminuye ( $R^2 = 0,74$ , Figura 3A). Esta relación no siempre sigue esta tendencia y depende del tipo de suelo. Lu et al. (2021) han determinado una relación inversa y un buen ajuste ( $R^2 = 0,63$ ) entre ambas propiedades, en los primeros 40 cm de suelos de bosques tropicales en China. No obstante, en suelos agrícolas de la región pampeana Argentina, esta relación no se presenta (Sainz et al., 2011). Si bien en suelos derivados de materiales volcánicos se presenta una correlación entre pH y COS ( $r = -0,52$ ), esta no alcanzó un nivel mínimo de significancia ( $p = 0,07$ ,

**Cuadro 1.** Análisis descriptivo y correlaciones de Pearson-r para propiedades de los suelos del transecto.

**Table 1.** Descriptive analysis and Pearson-r correlations for transect soil properties.

Propiedad del suelo	pH [log H <sup>+</sup> ]	$Al_a$ [mg kg <sup>-1</sup> ]	COS [%]	$\rho_b$ [g cm <sup>-3</sup> ]
Mínimo	5,4	425	0,8	0,19
Máximo	6,4	2391	13,3	0,82
Media	5,8	1841	8,8	0,56
DS	0,4	710	4,6	0,24
EE	0,2	290	1,9	0,09
CV [%]	7,5	39	52	43
... r ...				
pH [log H <sup>+</sup> ]	...			
$Al_a$ [mg kg <sup>-1</sup> ]	0,386	...		
COS [%]	<b>-0,861*</b>	-0,411	...	
$\rho_b$ [g cm <sup>-3</sup> ]	-0,157	<b>0,825*</b>	0,141	...

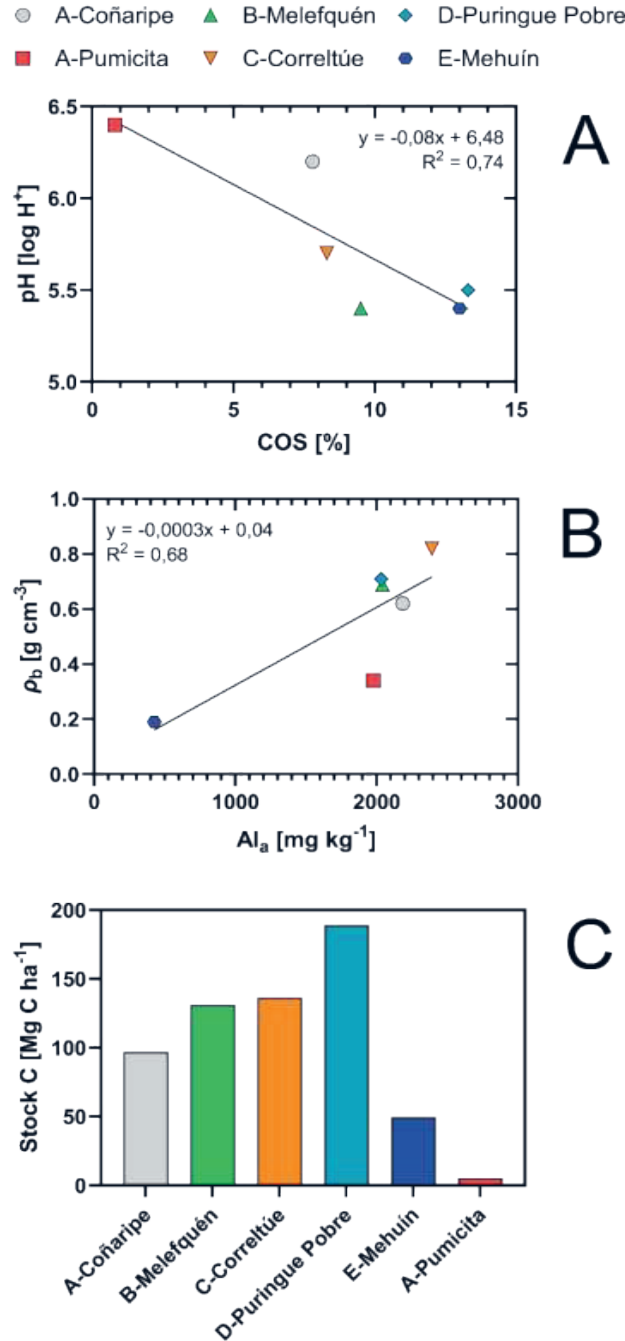
DS: Desviación estándar | EE: Error estándar de la media |  $Al_a$ : Aluminio extractable | COS: Carbono orgánico del suelo |  $\rho_b$ : Densidad aparente. En negrita se resaltan las principales correlaciones. \*p-valor < 0,05.

DS: Standard deviation | EE: Standard error of the mean |  $Al_a$ : Exchangeable aluminium | COS: Soil organic carbon |  $\rho_b$ : Bulk density. The main correlations are highlighted in bold. \*p-value < 0.05.

Beinroth *et al.*, 1985). La materia orgánica del suelo posee grupos funcionales ácidos (COOH) que son fuente de iones  $H^+$  favoreciendo el proceso de acidificación en los suelos (Weil y Brady, 2017). Si bien este proceso de-

pende de los factores ambientales, su distribución en el espacio y tiempo depende también de factores antrópicos (Ou *et al.*, 2017). En suelos agrícolas de China, la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados ha inducido procesos de acidificación promoviendo la acumulación de COS (Zhang *et al.*, 2020). No obstante, suelos con un mayor contenido de COS tienen una mayor capacidad de intercambiar cationes para consumir  $H^+$  y una mayor capacidad de fijación de cationes, es decir en su capacidad de amortiguación de pH es mayor (Jiang *et al.*, 2018).

Por su parte, la fracción coloidal mineral ( $Al_a$ ) y la densidad aparente ( $\rho_b$ ) poseen una relación directa y positiva (Figura 3B). Sin embargo, a pesar del buen ajuste de la regresión ( $R^2 = 0,68$ ) la correlación entre dichas propiedades no implica una causalidad. Esto se debe a la escala de influencia de ambas propiedades. La determinación de  $\rho_b$  implica la utilización de un cilindro que permite la obtención de una muestra sin alterar, es decir mantiene los agregados de suelo y el espacio que hay entre ellos en un volumen definido ( $100\text{ cm}^3$ ). A su vez, la determinación de  $Al_a$  conlleva la homogeneización del suelo a través de un tamiz  $< 2\text{ mm}$ , es decir se trabaja con el suelo a escala de microagregados.  $Al_a$  es un indicador que ha sido ampliamente utilizado en suelos volcánicos y se asocia al tipo de arcilla (Matus *et al.*, 2006) y a los niveles de COS (Matus *et al.*, 2008). Los niveles de  $\rho_b$  encontrados en A-Pumicita ( $0,34\text{ g cm}^{-3}$ ) pueden responder al fenómeno físico de la tixotropía que es habitual en suelos de origen volcánico (Baumgarten *et al.*, 2013). Por su parte la  $\rho_b$  del sitio E-Mehuín ( $0,19\text{ g cm}^{-3}$ ) estarían asociados a la acumulación de materia orgánica debido a la presencia de una napa freática que reduce la tasa de descomposición (Górecki *et al.*, 2021). Esta materia orgánica no se encuentra en un proceso de humificación avanzado y, por tanto, no participa activamente de la fracción coloidal del suelo lo que se evidencia en el valor más bajo de  $Al_a$  ( $425\text{ mg kg}^{-1}$ ) encontrado en los suelos del transecto. El valor máximo de  $\rho_b$  se encontró en el suelo C-Correltúe ( $0,82\text{ g cm}^{-3}$ ) y se relaciona con el contenido de arcilla (44%) que posee esa serie de suelo en superficie (CI-REN, 2003).



**Figura 3.** Regresiones lineales entre pH vs. COS (A),  $Al_a$  vs.  $\rho_b$  (B) y stock de C de los suelos del transecto. COS: Carbono orgánico del suelo |  $Al_a$ : Aluminio extractable |  $\rho_b$ : Densidad aparente.

**Figure 3.** Linear regressions between pH vs. COS (A),  $Al_a$  vs.  $\rho_b$  (B) and C stocks of the transect soils. COS: Soil organic carbon |  $Al_a$ : Exchangeable aluminium |  $\rho_b$ : Bulk density.

### Stock de C en suelos del transecto

Una de las funciones ecológicas más importantes de los suelos es el almacén de C. Se estima que la reserva de carbono orgánico en los suelos es tres veces mayor que el carbono orgánico total de la biomasa vegetal y el doble que el carbono orgánico de la atmósfera (Blum, 2005). Si bien, no se encontró una relación entre COS y  $\rho_b$  estas propiedades permiten evaluar la función ecosistémica de almacén de carbono que poseen los suelos del transecto. El suelo D-Puringue Pobre es capaz de almacenar una mayor cantidad de C ( $189\text{ Mg ha}^{-1}$ ),

mientras que la menor capacidad de almacenamiento se encontró en el material pumicítico (5 Mg C ha<sup>-1</sup>). Simon *et al.* (2018) reportaron stocks de C entre 57 y 338 Mg ha<sup>-1</sup> para suelos desarrollados en un gradiente altitudinal en el Himalaya. En suelos derivados de materiales volcánicos, Tsui *et al.* (2013) reportaron stocks de C de 89, 113 y 156 Mg ha<sup>-1</sup> en los primeros 30, 50 y 100 cm, respectivamente. En el contexto del transecto, los suelos tendieron a acumular más carbono desde la precordillera de los Andes hasta la Depresión Intermedia, mientras que en los suelos de la Cordillera de la Costa esta capacidad disminuye (Figura 3C). Los cambios en el stock de C se relacionan con los cambios altitudinales que provocan variaciones de los patrones de temperatura y precipitación que permiten el desarrollo de tipos de vegetación y suelos contrastantes (Tsui *et al.*, 2013; Simon *et al.*, 2018) como los encontrados en este gradiente longitudinal.

## CONCLUSIONES

En el transecto dominaron los suelos derivados de materiales volcánicos en donde propiedades como el pH y COS se relacionaron inversamente mientras que la relación entre  $Al_a$  y  $\rho_b$  fue directa pero no implicó causalidad. A su vez, el stock de C en los suelos tiende a aumentar desde la precordillera de los Andes hasta la depresión intermedia.

Los transectos de suelos son una herramienta pedagógica que permite una mejor comprensión de los suelos, el entorno en el que se desarrollan y las funciones y servicios que proveen a nuestra sociedad.

## AGRADECIMIENTOS

F. Zúñiga agradece al Dr. Garrett Liles de California State University Chico por facilitar la fotografía del perfil de suelo Melefquén. Asimismo, a los estudiantes de Ingeniería en Conservación de Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile, Sr. Esteban Calfuleo por facilitar la fotografía del perfil de suelo Coñaripe y a la Srta. Karol Guitard por el apoyo en la confección del mapa del transecto de suelos presentado en este manuscrito.

## REFERENCIAS

Bachmann, J., Goebel, M.-O., Krueger, J., Fleige, H., Woche, S.K., Dörner, J., Horn, R., 2020. Aggregate stability of south Chilean volcanic ash soils – A combined XPS, contact angle, and surface charge analysis. *Geoderma* 361, 114022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114022>

Baumgarten, W., Dörner, J., Horn, R., 2013. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. *Soil and Tillage Research* 129, 48–60.

Beinroth, F.H., Luzio, W., Maldonado, F., Eswaran, H., 1985. *Proceedings of the Sixth International Soil Classification*

Workshop, Chile and Ecuador. Part II: Tourguide for Chile. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile.

Besoain, E., 1985. Mineralogía de los suelos volcánicos del centro-sur de Chile. In: Tosso, J. (Ed.), *Suelos Volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura, Santiago, pp. 107–302.

Blum, W.E.H., 2005. Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 4, 75–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>

Caddy-Retalic S., Andersen A.N., Aspinwall M.J., Breed, M.F., Byrne, M., Christmas, M.J., Dong, N., Evans, B.J., Fordham, D.A., Guerin, G.R., Hoffmann, A.A., Hughes, A.C., van Leeuwen, S.J., McInerney, F.A., Prober, S.M., Rossetto, M., Rymer, P.D., Steane, D.A., Wardle, G.M., Lowe, A.J., 2017. Bioclimatic transect networks: Powerful observatories of ecological change. *Ecology and Evolution* 7, 4607–4619. <https://doi.org/10.1002/ece3.2995>

Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., Luzio, W., 2013. *The Soils of Chile*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5949-7>

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. *Estudio Agrológico X Región. Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos*. Publicación CIREN N° 123, Santiago, Chile.

Clunes, J., Pinochet, D., 2020. Retención de leucina por la fracción mineral del tamaño de arcilla. Un indicador del almacenamiento de C. *Agro Sur* 48 (3), 37–46. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n3-05>

Dahlgren, R.A., Saigusa, M., Ugolini, F.C., 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy*, Academic Press, pp. 113–182.

Doetterl, S., Stevens, A., Six, J., Merckx, R., Van Oost, K., Casanova, M., Casanova-Katny, A., Muñoz, C., Boudin, M., Zagal, E., Boeckx, P., 2015. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. *Nature Geoscience* 8, 780–783. <https://doi.org/10.1038/ngeo2516>

Fleige, H., Beck-Broichsitter, S., Dörner, J., Goebel, M.-O., Bachmann, J., Horn, R., 2016. Land use and soil development in southern Chile: Effects on physical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16 (3), 818–831. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000058>

Górecki, K., Rastogi, A., Stróżecki, M., Gąbka, M., Lamentowicz, M., Łuców, D., Kayzer, D., Juszczak, R., 2021. Water table depth, experimental warming, and reduced precipitation impact on litter decomposition in a temperate *Sphagnum*-peatland. *Science of The Total Environment* 77, 145452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145452>

Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2022. VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal, Resultados Finales. <https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario/resultados-finales/graficas-regionales#14>

Jiang, J., Wang, Y-P., Yu, M., Cao, N., Yan, J., 2018. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology* 501, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.10.009>

Lu, X., Vitousek, P.M., Mao, Q., Gilliam, F.S., Luo, Y., Turner, B.L., Zhou, G., Mo, J., 2021. Nitrogen deposition acce-

- lerates soil carbon sequestration in tropical forests. PNAS 18 (16), e2020790118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020790118>
- Matus, F., Amigo, X., Kristiansen, S.M., 2006. Aluminium stabilization controls organic carbon levels in Chilean volcanic soils. *Geoderma* 132, 158–168.
- Matus, F., Garrido, E., Sepúlveda, N., Cárcamo, I., Panichini, M., Zagal, E., 2008. Relationship between extractable Al and organic C in volcanic soils of Chile. *Geoderma* 148, 180–188.
- Ou, Y., Rousseau, A.N., Wang, L., Yan, B., 2017. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—A case study of the Black Soil Region of Northeastern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 245, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.003>
- Padarian, J., Morris, J., Minasny, B., McBratney, A.B., 2018. Pedotransfer Functions and Soil Inference Systems, in: McBratney, A., Minasny, B., Stockmann, U. (Eds.), *Pedometrics. Progress in Soil Science*. Springer, Cham, pp. 195–220. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7)
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, Mora, M., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Serie Actas Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) N° 34, Santiago, Chile.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H., Angelini, H., 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29 (1), 29–37.
- Sandoval M., Dörner J., Seguel O., Cuevas J., Rivera D., 2012. Métodos de Análisis Físicos de Suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. Publicación N° 5, Chillán, Chile.
- Simon, A., Dhendup, K., Rai, P.B., Gratzer, G., 2018. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan mountain forests. *Geoderma Regional* 12, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.11.004>
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12<sup>th</sup> ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Tsui, C.C., Tsai, C.C., Cheng, Z.S., 2013. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma* 209–210, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013>
- Vera-Peters, V., Zúñiga, F., Valle, S., Dec, D., Clunes, J., Dörner, J., 2022. Shrinkage Behavior of Aquands Along a Longitudinal Climatic Gradient in Southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 23, 638–650. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01071-9>
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* 37, 29–38.
- Weil, R.R., Brady, N.C., 2017. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson, New York.
- Zúñiga Ugalde, F., Piña, F., Riquelme, M., Villazón, C., Dec, D., Riedel, L., 2019. Morpho-physiological responses of Italian ryegrass to volcanic ashfalls from Calbuco. *Agro Sur* 47 (3), 5–13. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-02>

