



## Cambios estructurales de un Andisol con coberturas pratenses contrastantes

### Structural changes of an Andisol with contrasting pasture coverages

Zúñiga, F.<sup>a,b\*</sup>, Dec, D.<sup>b,c</sup>, López, I.F.<sup>b,d</sup>, Dörner, J.<sup>b,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> Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile.

<sup>d</sup> School of Agriculture and Environment, Massey University, Palmerston North 4410, New Zealand.

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

Grazing  
Soil structure  
Air conductivity

Short Communication,  
Soil Science

##### \*Corresponding author:

Felipe Zúñiga U.

E-mail address:

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

#### ABSTRACT

In Southern Chile, pastures are the most used feed component in livestock systems. Excessive grazing can alter the mechanical and hydraulic properties of the soil causing a negative effect on its structure. Temporal changes caused by sheep grazing on soil mechanical and hydraulic properties were evaluated under contrasting grassland cover conditions.

Four types of pastures were established on an Andisol (T1-Mixed; T2-Multispecies; T3-Naturalised without fertilisation; T4-Naturalised with fertilisation), which were grazed with an instantaneous stocking rate of 625 ewes ha<sup>-1</sup>. Post-grazing (Dec. 2010 and Oct. 2011) undisturbed soil samples (0-10 cm) were collected to determine soil bearing capacity (CS) and soil air conductivity (*kl*). Soil CS ranged from "very low" (< 30 kPa) to "low" (30-60 kPa) over a range of 7 kPa (T2-2011) to 57 kPa (T3-2011). Convective air fluxes (*kl*) were below the threshold value of -3.26 log cm s<sup>-1</sup>, independent of measurement year or meadow type. However, the average air fluxes for T3 and T4 were -3.9 log cm s<sup>-1</sup> and -4.6 log cm s<sup>-1</sup> for T1 and T2. The relationship between CS and *kl* in the 2011 season ( $p = 0.011$ ;  $R^2 = 0.978$ ) suggests an increase in soil structural stability associated with mineral fertilization that allowed greater root development and air flow in soils that maintained their structure.

#### RESUMEN

Las praderas son el componente alimenticio más utilizado en los sistemas ganaderos en el sur de Chile. El pastoreo excesivo puede alterar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo provocando un efecto negativo sobre su estructura. Se evaluaron los cambios temporales provocados por el pastoreo ovino sobre propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo en condiciones contrastantes de coberturas pratenses.

Sobre un Andisol se establecieron 4 tipos de praderas (T1-Mixta; T2-Multiespecies; T3-Naturalizada sin fertilización y T4-Naturalizada con fertilización) que fueron pastoreadas con una carga instantánea de 625 ovejas ha<sup>-1</sup>. Posterior al pastoreo (dic. 2010 y oct. 2011) se colectaron muestras inalteradas (0-10 cm) para determinar la capacidad de soporte (CS) y conductividad de aire del suelo (*kl*).

La CS de los suelos varió de "muy baja" (< 30 kPa) a "baja" (30-60 kPa) en un rango de 7 kPa (T2-2011) a 57 kPa (T3-2011). Los flujos de aire convectivo (*kl*) estuvieron bajo el valor umbral de -3,26 log cm s<sup>-1</sup>, independiente del año de medición o tipo de pradera. No obstante, los flujos de aire promedio para T3 y T4 fueron de -3,9 log cm s<sup>-1</sup> y de -4,6 log cm s<sup>-1</sup> para T1 y T2. La relación entre CS y *kl* en la temporada 2011 ( $p = 0,011$ ;  $R^2 = 0,978$ ) sugiere un aumento de la estabilidad estructural del suelo asociada a la fertilización mineral que permitió un mayor desarrollo de raíces y un mayor flujo de aire en los suelos que mantuvieron su estructura.

**Palabras clave:** Pastoreo, estructura del suelo, conductividad de aire.

#### INTRODUCCIÓN

Chile posee una superficie agrícola productiva cercana a los 46 millones de ha. De esta, 530.000 ha corresponden a praderas mejoradas que se concentran en las regiones de Los Ríos y Los Lagos (70 %), mientras que 8 millones corresponden a praderas naturales

concentradas en la región de Magallanes y Antártica Chilena (INE, 2022). Actualmente, debido a su costo, el recurso pratense sigue siendo el componente alimenticio más utilizado en la alimentación animal de los sistemas ganaderos del sur de Chile y, en algunos casos, el único sistema posible de utilizar (Teuber *et al.*, 2007). Los herbívoros han coevolucionado con las praderas

y las han pastoreado desde el mioceno medio<sup>1</sup> (Stebbins, 1981). El pastoreo puede provocar beneficios en la pradera ya que permite el ingreso de luz a la base de los macollos estimulando su crecimiento (Duchini et al., 2014), recicla nutrientes a través del retorno de excretas (Greenwood y McKenzie, 2001) y favorece la biodiversidad de especies pratenses (Tälle et al., 2016). No obstante, cuando el pastoreo es excesivo y en la medida que supera su capacidad de soporte puede provocar efectos negativos como la compactación del suelo reduciendo el espacio poroso disponible para la macro y mesofauna del suelo (Zebrino, 2012) y para el almacén y conducción de agua y aire (Dörner y Dec, 2007).

El estrés ejercido sobre el suelo por los animales puede ser similar al generado por la maquinaria agrícola; sin embargo, debido a la superficie de contacto de las pezuñas de los animales, la deformación del suelo se restringe a los primeros 10 cm de profundidad. Los niveles promedio de presión alcanzados por el ganado ovino, cuando se encuentran en posición estática, alcanza 66 kPa, mientras que para el ganado bovino esta presión alcanza los 138 kPa (Greenwood y McKenzie, 2001).

Estos antecedentes evidencian un patrón lógico de alteración de las propiedades físicas del suelo causados por un proceso de compactación (Hartge y Ellies, 1999). Sin embargo, los cambios temporales en estas propiedades y más aún su magnitud son más importantes, ya que permiten no solo detectar los efectos de cambio de uso del suelo a largo plazo, sino también planificar un manejo sustentable de los agroecosistemas (Dörner et al., 2012; Zúñiga et al., 2015). El objetivo de este estudio fue evaluar las alteraciones temporales provocadas por el pastoreo ovino sobre propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo en condiciones contrastantes de coberturas pratenses.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio y diseño experimental

Valdivia presenta un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, con temperaturas medias anuales de 12 °C, con precipitaciones promedio de 2.400 mm distribuidas estacionalmente y tendientes a la disminución (González-Reyes y Muñoz, 2013). El suelo se formó a partir de cenizas volcánicas distribuidas sobre depósitos marinos denominados canagua. La topografía es compleja, con pendientes dominantes de 3 a 8 % y sectores ligeramente ondulados, de 2 a 5 % (CIREN, 2003). Una descripción completa del perfil de suelo se puede encontrar en Bravo et al. (2019).

Se establecieron 12 parcelas de 400 m<sup>2</sup> (20 m x 20 m) distribuidas en 3 bloques completos al azar al interior de la Estación Experimental Agropecuaria Austral (EEAA) (39°46' S, 73°13' O), perteneciente a la Universidad Austral de Chile. En estos se establecieron 4 tratamientos (praderas) correspondientes a T1: Mixta; compuesta por *Lolium perenne* L. (25 kg ha<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> + *Trifolium repens* L. (5 kg ha<sup>-1</sup>), T2: Multiespecies (Mult.); compuesta por *Bromus valdivianus* Phil. (27 kg ha<sup>-1</sup>), *L. perenne* (9 kg ha<sup>-1</sup>), *Dactylis glomerata* (4 kg ha<sup>-1</sup>) y *T. repens* (5 kg ha<sup>-1</sup>), T3: Naturalizada sin fertilización (NsF) y T4: Naturalizada con fertilización (NcF). La preparación de suelos contempló el control de malezas, rastra off-set de discos (5 pasadas) y vibrocultivador (1 pasada). Las dosis de fertilización y enmienda para T1, T2 y T4, correspondieron a dosis anuales de 180 kg N ha<sup>-1</sup>; 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>; 120 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> y 2.000 kg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>. La carga animal instantánea fue de 625 ovejas ha<sup>-1</sup>.

### Muestreo y propiedades físicas del suelo

En diciembre 2010 y octubre 2011, posterior a eventos de pastoreo, se colectaron muestras inalteradas en cilindros de acero inoxidable. Se determinó la curva de consolidación mediante el uso de un odómetro con drenaje libre (Controls T303), en muestras no disturbadas de suelo (n = 12; v = 120 cm<sup>3</sup>) equilibradas a un potencial mátrico ( $\psi_m$ ) de -6 kPa. Se realizó un ciclo de cargas estáticas sucesivas (6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 y 400 kPa) cada 6 min y un ciclo de descargas (200 - 100 - 50 - 6,25 y 1 kPa), durante los cuales se registró la deformación vertical del suelo (0,001 mm de precisión). A partir de las curvas de consolidación se determinó a capacidad de soporte (CS) del suelo utilizando el método gráfico de Casagrande (1936).

Previo al ensayo de consolidación se determinó la conductividad de aire ( $kl$ ) a  $\psi_m = -6$  kPa, utilizando un flujómetro de aire (Key Instruments, Trevore, USA). El instrumento permite medir desde 0,04 hasta 50 L min<sup>-1</sup>, cuando se aplica una diferencia de presión de 0,1 kPa (Dörner y Dec, 2007). Durante las mediciones se registraron los cambios de presión atmosférica y temperatura que fueron utilizados en los cálculos de  $kl$ .

$$kl = \frac{\rho_l \times g \times Q_l \times L}{A_s \times p}$$

Donde,  $kl$ : conductividad de aire [cm s<sup>-1</sup>];  $\rho_l$ : densidad del aire [kg m<sup>-3</sup>];  $g$ : aceleración de gravedad [m s<sup>-2</sup>];  $Q_l$ : tasa de flujo de aire [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>];  $L$ : largo de la muestra de suelo [m];  $A_s$ : área de la muestra de suelo [m<sup>2</sup>];  $p$ : diferencia de presión neumática (0,1 kPa).

<sup>1</sup> Corresponde a una sub-época del Mioceno que se desarrolló entre 16 a 11 millones de años antes del presente.

<sup>2</sup> Los valores entre paréntesis indicados luego del nombre científico de la especie corresponden a la dosis de siembra.

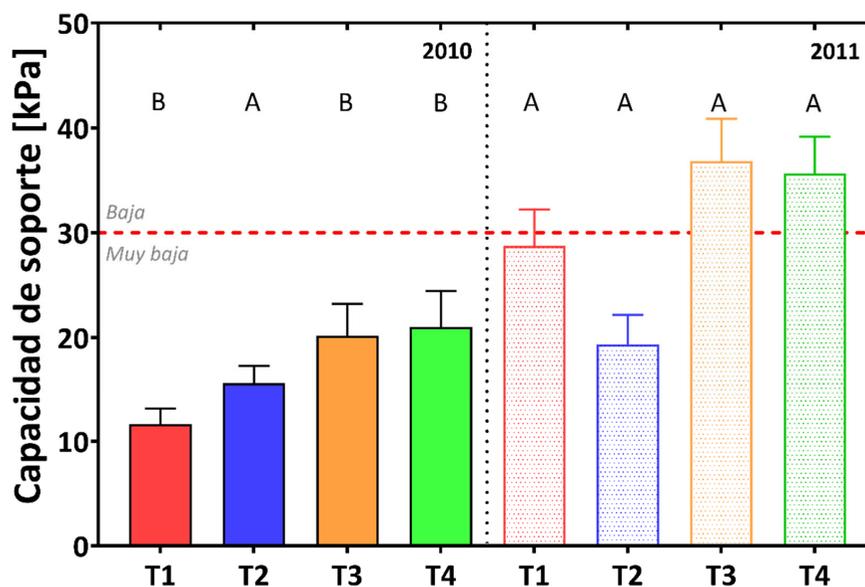
## Análisis estadísticos

La normalidad de los residuales se determinó con la prueba de D'Agostino & Pearson y homogeneidad de varianza a partir de la prueba de Barlett's. Se realizaron análisis de varianza y test de los mínimos cuadrados de Fisher's para evaluar diferencias entre las medias anuales (2010 vs. 2011) de un mismo tratamiento. Cuando los datos no superaron los supuestos se presentaron en diagramas de caja los que también pueden usarse gráficamente para determinar diferencias significativas entre las medianas (McGill *et al.*, 1978). Se realizó un análisis de correlación de Pearson y una regresión lineal simple entre CS y *kl*. Los análisis se realizaron utilizando el programa GraphPad Prism versión 10.3.0.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fuerzas de cohesión interna que mantienen unidas a las partículas primarias, los ciclos de humectación y secado, y la actividad biológica determinan la estabilidad estructural de un suelo (Krümmelbein *et al.*, 2008). Esta estabilidad puede ser determinada a partir de la capacidad de soporte (CS) que representa la máxima carga que un suelo es capaz de soportar antes de sufrir una deformación irreversible (Kézdi, 1980). La mínima CS se alcanzó en T2-2011 (7 kPa) y el valor

máximo fue encontrado en T3-2011 (57 kPa). Luego de 10 meses, los eventos de pastoreo provocaron un incremento promedio de 17,1 kPa, 16,6 kPa y 14,6 kPa para T1, T3 y T4, respectivamente y se asocia al efecto acumulativo de los ciclos de pastoreo. Krümmelbein *et al.* (2008), reportaron valores de CS de 40 kPa en Chernozems que no han sido sometidos a pastoreo. En suelos volcánicos (Hapludand) se han reportado valores de 62 kPa en praderas degradadas que, luego de la labranza, han disminuido a 12 kPa (Vásquez *et al.*, 2012). Horn y Fleige (2009) han definido niveles umbrales para la CS en Luvisols<sup>3</sup> señalando que valores bajo 30 kPa de CS son considerados "muy bajos". Independiente del incremento de CS entre las praderas, los niveles de CS se mantienen en valores muy bajos en 2010 y bajos en 2011 (Figura 1) lo que sugiere que estas praderas no presentan problemas de compactación. La estabilidad estructural del suelo bajo estas praderas en escala temporal fue confirmada en un estudio de compactación sobre praderas sembradas luego de labranza tradicional, realizado posteriormente en el mismo sitio del presente trabajo; en este estudio, se encontraron valores muy similares de CS, es decir, en un rango muy bajo y bajo, para densidades aparentes entre 0,6 y 0,8 Mg m<sup>-3</sup>, señalando sin embargo, que puedan llegar a valores de CS medios cuando la densidad aparente se acerca a 0,9 Mg m<sup>-3</sup> (Dörner *et al.*, 2022).



**Figura 1.** Capacidad de soporte (CS) para 4 praderas. Barras llenas corresponden a CS-2010 y barras punteadas a CS-2011. Se presentan valores medios  $\pm$  error estándar de la media ( $n = 9$ ). La línea roja segmentada indica el valor crítico de CS (Horn y Fleige, 2009).

**Figure 1.** Bearing capacity (CS) for 4 pastures. Filled bars correspond to CS-2010 and dotted bars to CS-2011. Mean values  $\pm$  standard error of the mean ( $n = 9$ ) is presented. The segmented red line indicates the critical CS value (Horn and Fleige, 2009).

<sup>3</sup> De acuerdo con la clasificación taxonómica utilizada en Chile (*Soil Taxonomy*, USDA), Chernozems y Luvisols son homólogos a Mollisols y Alfisols respectivamente.

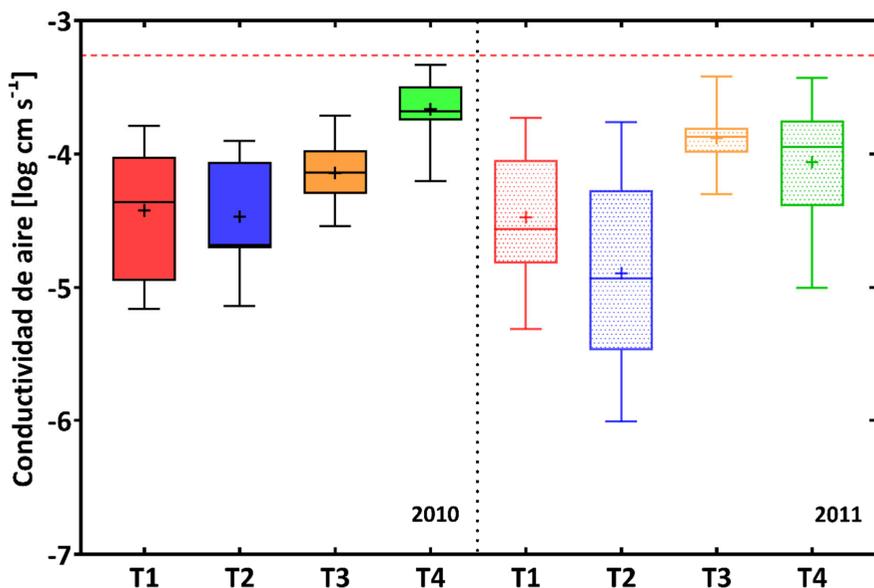
Si bien es cierto, la CS indica la resistencia a la deformación que ofrece la estructura del suelo frente a un estrés aplicado, no entrega información sobre su funcionalidad; factor relevante al momento de evaluar la compactación (Horn y Fleige, 2009). El flujo convectivo de aire sigue los mismos principios descritos en la ley de Darcy y se produce principalmente por diferencias de presión entre la atmósfera y el aire del suelo (Parlange *et al.*, 1998). Horn y Fleige (2009), proponen a la conductividad de aire (*kl*) como un indicador de funcionalidad sensible para evaluar el nivel de compactación de un suelo. Según los autores un suelo presentaría problemas de compactación bajo el valor crítico  $< -3,26 \log \text{ cm s}^{-1}$ . En la presente investigación, *kl* estuvo en el rango entre  $-3,33 \log \text{ cm s}^{-1}$  (T4-2010) y  $-6,01 \log \text{ cm s}^{-1}$  (T2-2011), es decir, para ambas temporadas e independiente del tipo de pradera, los niveles fueron más bajos que los niveles críticos propuestos en la literatura (Figura 2). No obstante, suelos que mantuvieron su estructura bajo praderas naturalizadas (T3 y T4) vs. praderas en las que la estructura se vio alterada por la preparación de suelo y siembra de especies pratenses (T1 y T2), fueron capaces de conducir un 336 % más de aire por convección. Esto se condice con lo descrito por Dörner *et al.* (2022), tal que el suelo bajo labranza convencional, sembrado y expuesto a compactación alcanzó niveles restrictivos de flujo convectivo de aire en los sectores del suelo con mayor densidad aparente y CS.

Flujos de aire menores a los niveles críticos propuestos fueron también reportados por Zúñiga *et al.* (2019),

en horizontes genéticos de suelos Ñadi (Aquands) del centro sur de Chile. En promedio, *kl* para esos suelos fue de  $-3,7 \log \text{ cm s}^{-1}$  a  $-6 \text{ kPa}$  de potencial mátrico. Sin embargo, cuando se evaluó el flujo de aire, en los horizontes A y BCr, se alcanzaron niveles “muy altos” ( $kl = -2,04 \log \text{ cm s}^{-1}$  y  $-2,17 \log \text{ cm s}^{-1}$ ).

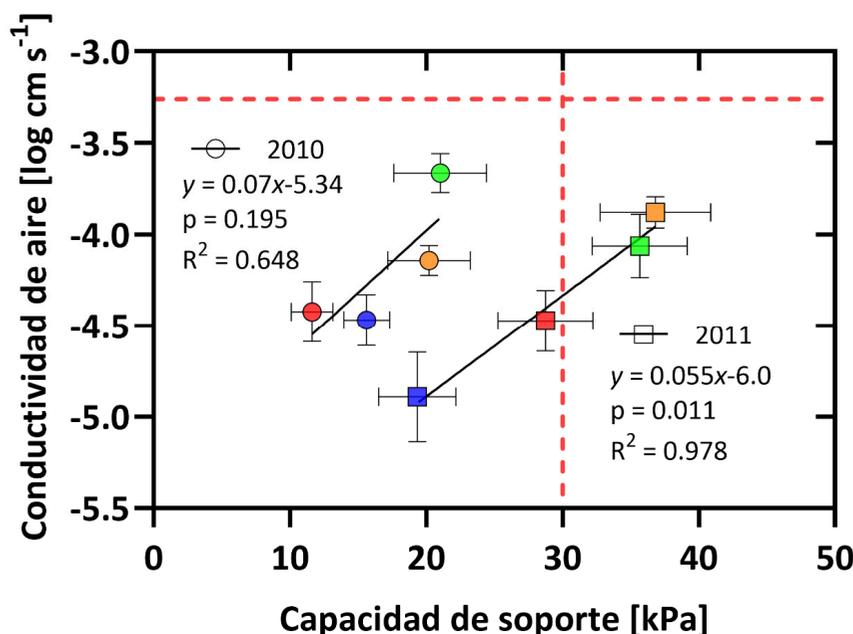
La capacidad de soporte del suelo y la conductividad de aire se correlacionaron positivamente para el año 2010 ( $r = 0,805$ ) como para el año 2011 ( $r = 0,989$ ). Esta relación puede ser descrita como una regresión lineal simple que fue significativa sólo para el año 2011 ( $p = 0,011$ ;  $R^2 = 0,978$ ) (Figura 3).

Esta relación entre CS y *kl* no fue significativa ( $r^2 = 0,05$ ) para suelos Luvisoles y sólo se esperaría una relación positiva entre CS y *kl* en suelos estables y de alta funcionalidad como Calcic Chernozems (Horn y Fleige, 2009). En este estudio, el Andisol desarrollado bajo praderas naturalizadas que mantuvieron su estructura (T3 y T4), incrementó su capacidad de soporte transitando de un nivel “muy bajo” ( $< 30 \text{ kPa}$ ) a un nivel “bajo” ( $30-60 \text{ kPa}$ ) y mantuvo su funcionalidad lo que está en directa relación con su mineralogía amorfa, altos contenidos de carbono orgánico (7,3% en horizonte  $A_p = 0-12 \text{ cm}$ ) y formación de complejos Al-humus (Baumgarten *et al.*, 2013; Zúñiga *et al.*, 2015). Este incremento en la estabilidad estructural del suelo se reflejó en una mayor conducción de aire debido a que se mantuvo una mayor continuidad entre sus poros (Zúñiga *et al.*, 2015). Esta conexión y espacio poroso funcional permite también que el suelo almacene un mayor conte-



**Figura 2.** Conductividad de aire (*kl*) para 4 praderas. Barras llenas corresponden a *kl*-2010 y barras punteadas a *kl*-2011. Se presentan valores medios  $\pm$  error estándar de la media ( $n = 9$ ). La línea roja segmentada indica el valor crítico de *kl* (Horn y Fleige, 2009).

**Figure 2.** Air conductivity (*kl*) for 4 pastures. Filled bars correspond to *kl*-2010 and dotted bars to *kl*-2011. Mean values  $\pm$  standard error of the mean ( $n = 9$ ) is presented. The segmented red line indicates the critical *kl* value (Horn and Fleige, 2009).



**Figura 3.** Regresión lineal entre capacidad de soporte (CS) y conductividad de aire ( $kl$ ) para T1 [rojo]; T2 [azul]; T3 [naranja]; T4 [verde] y las temporadas 2010 [○] y 2011 [□]. Las líneas rojas segmentada indican los valores críticos para CS y  $kl$  (Horn y Fleige, 2009).

**Figure 3.** Linear regression between bearing capacity (CS) and air conductivity ( $kl$ ) for T1 [red]; T2 [blue]; T3 [orange]; T4 [green] y and the 2010 [○] and 2011 [□] seasons. The segmented red lines indicate the critical values for CS and  $kl$  (Horn and Fleige, 2009).

nido de agua disponible y, en consecuencia, desarrolle mayor biomasa radical y aérea (Descalzi *et al.*, 2018).

## CONCLUSIONES

Luego de 10 meses, el pastoreo provocó un aumento de la estabilidad estructural y del flujo de aire en suelos que conservaron su estructura y que fueron fertilizados. Esto, permitió el desarrollo de un espacio físico que podría favorecer crecimiento y desarrollo de especies pratenses, componente que no fue evaluado en esta investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en la tesis de magister del autor de correspondencia y fue financiada por el proyecto FONDECYT 1100957 "Sustainable Pasture Improvement and its Relationship to Soil Quality".

## REFERENCIAS

- Baumgarten, W., Dörner, J., Horn, R., 2013. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. *Soil and Tillage Research* 129, 48–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.01.007>
- Bravo, S., González-Chang, M., Dec, D., Valle, S., Wendroth, O., Zúñiga, F., Dörner, J. 2020. Using wavelet analyses to

identify temporal coherence in soil physical properties in a volcanic ash-derived soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 285–286. <https://doi.org/10.1016/j.agr-formet.2020.107909>

- Casagrande, A. 1936. Characteristics of cohesive soils affecting the stability of slopes and Earth fill. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* 23, 13–32.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. Estudio Agrológico X Región. Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos. Publicación CIREN N° 123, Santiago, Chile.
- Descalzi, C., Balocchi, O., López, I., Kemp, P., Dörner, J., 2018. Different soil structure and water conditions affect the growing response of *Lolium perenne* L. and *Bromus valdivianus* Phil. growing alone or in mixture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18 (3), 617–635. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001901>
- Dörner, J., Dec, D., 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7 (2), 1–13.
- Dörner, J., Dec, D., Feest, E., Vásquez, N., Díaz, M., 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. *Soil and Tillage Research* 125, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.019>
- Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., Horn, R., Uteau, D., Wendroth, O., Lagos, L., Zúñiga, F., 2022. Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research* 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>

- Duchini, P.G., Guzatti, G.C., Ribeiro Filho, H.M.N., Sbrissia, A.F., 2014. Tiller size/density compensation in temperate climate grasses grown in monoculture or in intercropping systems under intermittent grazing. *Grass and Forage Science* 69 (4), 655–665. <https://doi.org/10.1111/gfs.12095>
- González-Reyes, A., Muñoz, A., 2013. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque (Valdivia)* 34 (2), 191–200. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000200008>
- Greenwood, K.L. McKenzie, B.M., 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41, 1231–1250. <https://doi.org/10.1071/EA00102>
- Hartge, K.H., Ellies, A., 1999. El rol de la física del suelo en la producción agrícola. *Agro Sur* 27 (1), 43–56. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1999.v27n1-06>
- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.015>
- 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>
- Kézdi, A., 1980. *Handbook of Soil Mechanics*, Vol. 2. Soil Testing. Elsevier, Amsterdam.
- Krümmelbein, J., Peth, S., Horn, R., 2008. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil and Tillage Research* 99, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.008>
- McGill, R., Tukey, J., Larsen, W., 1978. Variations of box plots. *The American Statistician* 32, 12–16.
- Parlange, M.B., Cahill, A.T., Nielsen, D.R., Hopmans, J.W., Wendroth, O., 1998. Review of heat and water movement in field soils. *Soil and Tillage Research* 47 (1–2), 5–10. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00066-X)
- Stebbins, G.L., 1981. Coevolution of Grasses and Herbivores. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 68 (1), 75–86. <https://doi.org/10.2307/2398811>
- Tälle, M., Deák, B., Poschlod, P., Valkó, O., Westerberg, L., Milberg, P., 2016. Grazing vs. mowing: A meta-analysis of biodiversity benefits for grassland management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 222, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.008>
- Teuber, N., Parga, J., Balocchi, O., Anwandter, V., Canseco, C., Abarzúa, A., Demanet, R., Lopetegui, J., 2007. Capítulo 1. Introducción, in: Teuber, N., Balocchi, O., Parga, J. (Eds.), *Manejo del pastoreo*, Imprenta América, Osorno, Chile. pp. 23–50.
- Vásquez, N., Salazar, F., Dörner, J., 2012. Variabilidad temporal de las propiedades físico-mecánicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo labranza convencional. *Agro Sur* 40 (3), 1–13.
- Zebrino, S., 2012. Efecto de rotaciones cultivo-pasturas en siembra directa, con pastoreo, sobre comunidades de Oligochaeta. *Agrociencia (Uruguay)* 16 (1), 15–23.
- Zúñiga, F., Ivelic-Sáez, J., López, I., Huygens, D., Dörner, J., 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil and Tillage Research* 145, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>
- Zúñiga, F., Horn, R., Rostek, J., Peth, S., Uteau, D., Dörner, J., 2019. Anisotropy of intensity–capacity parameters on Aquands with contrasting swelling–shrinkage cycles. *Soil and Tillage Research* 193, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.019>