



Propiedades físicas de los agregados de suelos en bosques y praderas con régimen ácuico

Physical properties of soil aggregates in forest and grasslands with an aquic regime

Bravo, A.^a, Zúñiga, F.^{b,c}, Valle, S.^{c,d}, Thiers, O.^{c,e},
Dec, D.^{c,d}, Clunes, J.^{c,d}, Dörner, J.^{c,d,*}

^a Magíster en Ciencias del Suelo, Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.

^b Departamento de Ciencias Naturales y Tecnología, Universidad de Aysén, Eusebio Lillo 630, Coyhaique.

^c Centro de Investigación en Suelos Volcánicos, Universidad Austral de Chile.

^d Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

^e Instituto de Bosque y Sociedad, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16.12.2020

Accepted 19.05.2021

Keywords:

Ñadi soils

Soil structure

Organic carbon

Land use

Original Research Article,

Soil Science

*Corresponding author:

José Dörner

E-mail address:

josedorner@uach.cl

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the effect of the land use change (CUS) of a Ñadi soil (Aquands) from secondary forest to naturalised grassland, on the aggregate stability (tensile strength and shrinkage capacity) and its relationship with the soil water tension (drying effect), the wetting capacity and the soil organic carbon. The site belongs to the Alerce soil series. The research unit consists of four land uses: Renewal Alerce Forest (BN1), a secondary native forest (BN2), naturalised pasture 1 (PN1, without mole drainage), and naturalised pasture 2 (PN2, with mole drainage). Four soil depths were sampled at each site. Total porosity (PT), plant available water (ADP), air capacity (CA), aggregate shrinkage capacity (COLE), mechanical resistance (Crushing Test method), repellency index (Sorptivity) and soil organic carbon (CO) were determined.

CUS in Aquands alters the water regime causing a loss of PT (down to 28% in H1) and 30% of ADP in the surface horizons (H1 and H2), which restricts the shrinkage capacity of aggregates. Although all the aggregates in every site shrink due to water loss, PN1 and PN2 show less shrinkage (COLE > 0.15) due to lower PT and higher bulk density (0.53 Mg m⁻³). The intensification of land use causes changes in the CO content of the soil, which decreases as the depth increases (27% to 5%) in all soil uses evaluated.

RESUMEN

El cambio de uso de suelo (CUS) de bosque nativo a pradera naturalizada reduce el volumen de macroporos e incrementa la resistencia mecánica de los Aquands (Ñadi). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del CUS sobre la estabilidad de los agregados y su relación con la capacidad de humectación y el contenido de carbono orgánico en un suelo Ñadi (Duric Histic Placaquands). Cuatro usos de suelo fueron evaluados: Renova de bosque de Alerce (BN1), bosque nativo secundario (BN2), pradera mejorada sin drenaje topo (PN1) y pradera mejorada con drenaje topo (PN2). Se colectaron agregados a cuatro profundidades de muestreo por cada sitio. Se determinaron: la porosidad total (PT), el agua disponible para las plantas (ADP), la capacidad de aire (CA), la contracción de los agregados (COLE), la resistencia mecánica (Crushing test), el índice de repelencia (Sortividad), y el carbono orgánico (CO) del suelo.

El CUS en Aquands, altera el régimen hídrico provocando una pérdida de la PT (hasta un 28% en H1) y de un 30% del ADP en los horizontes superficiales (H1 y H2), lo que restringe la capacidad de contracción de los agregados. Si bien todos los agregados de todos los sitios se contraen debido a la pérdida de agua, PN1 y PN2 presentan una menor contracción (COLE > 0,15) debido a una menor PT y a una mayor densidad aparente (0,53 Mg m⁻³). La intensificación de uso de suelo provoca cambios en el contenido del CO del suelo, la cual disminuye conforme aumenta la profundidad (27% a 5%) en todos los usos de suelos evaluados.

Palabras clave: suelos Ñadi, estructura del suelo, carbono orgánico, uso del suelo.

INTRODUCCIÓN

El ordenamiento espacial de los agregados y su estabilidad definen el funcionamiento de los poros del suelo, es decir su capacidad de almacenamiento y conducción (Horn y Smucker, 2005; Dörner y Dec, 2007). Mientras que la configuración espacial de los agregados depende de los procesos de formación de estructura, su estabilidad esta determinada por su comportamiento frente a la humectación y su respuesta ante la acción de fuerzas externas (Horn y Smucker, 2005).

La capacidad de humectación de los agregados depende de la afinidad que estos presentan con el agua (Ellies et al., 1996), la cual se puede medir a través del ángulo de contacto ("a", Ellies et al., 1995) o del índice de repelencia de agua ("R", Tillman et al., 1989). Cuando un suelo no se humecta completamente ($a > 90^\circ$, $R > 1,95$) puede presentar resistencia a la humectación debido a la cantidad y calidad de compuestos orgánicos que aún no han sido degradados, tales como ácidos grasos, ceras, terpenos, entre otros (Ellies et al., 1995; Ellies et al., 2005; Urbanek et al., 2007).

La resistencia mecánica de los agregados depende de su densidad aparente (puntos de contacto entre partículas y agregados), contenido y tipo de arcilla, materia orgánica y cantidad de agua (Horn y Smucker, 2005). De esta manera, la resistencia a la humectación favorece la estabilidad mecánica de los agregados debido a un lento ingreso del agua al interior de estos, proceso que se intensifica cuando el suelo presenta un bajo contenido de humedad (Ellies et al., 1996; Cobos, 2010). Una lenta humectación de los agregados (condicionada por un incremento en la repelencia al agua) disminuye su capacidad de hinchamiento, aumentando su estabilidad y manteniendo una red de poros continua. Una hidrofobia excesiva puede ser perjudicial ya que impide la infiltración del agua, afectando la capacidad de almacenamiento del suelo debido al escurrimiento superficial del agua, generando erosión (Ellies y Mac Donald, 1989; Ellies et al., 2005) que a largo plazo pueden provocar una degradación física del suelo (Lal, 2015).

Los suelos de origen volcánicos (Andisoles) se caracterizan por presentar baja densidad aparente ($< 0,9 \text{ Mg m}^{-3}$), alta conductividad hidráulica ($> 2000 \text{ cm d}^{-1}$) y altos valores de resistencia a la humectación (ángulo de contacto $> 120^\circ$) en seco (Ellies et al., 1997; Dörner et al., 2013; Valle et al., 2018). Dentro de Andisoles, el suborden Aquands -o en el Sur de Chile conocidos como Ñadis- (Zúñiga et al., 2019a), corresponden a suelos que permanecen anegados en períodos de alta precipitación (4 meses, con precipitaciones sobre 1000 mm; Thiers et al., 2007), debido a su baja pendiente ($< 2\%$) y a la presencia de un horizonte plácico (Zúñiga et al., 2019a). Este horizonte cementado por hierro y/o manganeso determina que el drenaje inter-

no del suelo sea muy lento, produciendo una saturación total del perfil de suelo (Dec et al., 2017).

Recientes estudios en Aquands, han demostrado que el cambio de uso de suelo (CUS) desde renoval de bosque nativo a pradera naturalizada aumenta la densidad aparente, lo que conlleva una reducción en el volumen de macroporos y un incremento en su resistencia mecánica (Dörner et al., 2017; 2020). En esa misma línea, Dec et al. (2017) concluyeron que el cambio de cobertura y de uso del suelo disminuyen la conductividad hidráulica saturada y no saturada afectando el balance hídrico y el contenido de carbono orgánico del suelo. Mientras dichos estudios se han hecho a escala del perfil de suelo y de sus horizontes, el problema derivado del CUS no ha sido estudiado a nivel de los agregados del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del CUS de un Ñadi desde un renoval de bosque a pradera naturalizada, sobre la estabilidad de los agregados (resistencia a la tracción y capacidad de contracción) y su relación con la tensión de agua (efecto del secado), la capacidad de humectación y el contenido de carbono orgánico del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelo e historial de manejo

Esta investigación se llevó a cabo en el predio Chaqueihua, a 17 kilómetros al NO de la ciudad de Puerto Montt ($41^\circ 26' 31,72'' \text{ S}$, $73^\circ 7' 51,70'' \text{ O}$). La unidad de investigación (Figura 1A) consta de cuatro usos de suelo: un renoval de bosque de Alerce (BN1), un bosque nativo secundario (BN2), una pradera naturalizada sin drenaje topo (PN1) y una pradera naturalizada con drenaje topo (PN2 ambas praderas se originaron luego de un incendio accidental ocurrido en 1980, que duró aproximadamente 2-3 semanas (Haller et al., 2015). Posterior al incendio, se eliminaron los restos de tocones y raíces de los árboles, usando tracción animal, lo que permitió generar el espacio para el establecimiento natural de especies pratenses. No se registran eventos de labranza de suelo (araduras) o prácticas de mejoramiento (fertilización o enmiendas calcáreas). Entre octubre y diciembre del año 2015, se excavó una zanja colectora de 100 m, que permitió establecer 2 parcelas de drenaje con manejo contrastante (Figura 1A, 1B). Se estableció una red de drenajes del tipo "topo" en un diseño "espina de pescado" en una sección de 80 metros de largo. El arado topo operó a una velocidad de 3 km h^{-1} a una profundidad entre 40 y 50 cm, dependiendo de la variación espacial del horizonte BC que provoca el anegamiento temporal del perfil de suelo (Fig. 1C). La distancia de separación entre drenes topo fue de 5 m, obteniendo así una red compuesta por 16 drenes topo (Fig. 1D). Así, las praderas en PN1 y PN2 están separadas físicamente por la zanja colec-

tora principal. En el año 2016, se aplicaron enmiendas calcáreas y fertilización en ambas praderas.

El suelo corresponde a la serie Alerce (*Duric Histic Placaquands*) (CIREN, 2003), caracterizada por suelos delgados que se desarrollaron a partir de cenizas volcánicas holocénicas depositadas sobre un sustrato fluvio-glacial. Estos suelos dominan en sectores planos de la Depresión Intermedia y presentan limitaciones de drenaje interno, en parte debido a la presencia de un horizonte plácico (Bsm), que localmente se denomina "fierrillo" (Zúñiga *et al.*, 2019a). Posee un espesor entre 2-10 mm, siendo discontinuo, irregular y de cementación variable. La presencia de fierrillo sobre el sustrato fluvio-glacial favorece el anegamiento temporal de 2 a 4 meses (Thiers *et al.*, 2007; Dec *et al.*, 2017) reflejado en variaciones en su profundidad efectiva entre 30 cm a 90 cm (Dörner *et al.*, 2017).

Recolección de muestras de agregados de suelo

El muestreo se realizó en cada uso de suelo según horizontes genéticos, definidos en el estudio de Haller *et al.* (2015). La secuencia de horizontes H1-H2-H3-H4-H5 es para BN: Oe-A-AB-Bw1-Bw2 y para PN: Ap-A2-AB-Bw1-Bw2, respectivamente. Tomando en consideración la profundidad de los horizontes, las muestras de agregados fueron colectadas a partir de profundidades equivalentes: H1 (10 cm), H2 (17 cm), H3 (32 cm) y H4 (45 cm). Haller *et al.* (2015) reportaron una variación de la estructura del suelo desde bloques sub-angulares en superficie a bloques angulares en

profundidad. En cada uso de suelo, se colectaron bloques no disturbados de suelo que fueron almacenados en cajas plásticas (dimensión 30 cm x 15 cm x 10 cm, V: 4500 cm³). El suelo se disgregó a través de una fractura manual del bloque mayor, ejerciendo un mínimo de presión hacia los planos de falla, obteniendo así, agregados de distinto diámetro (Hartge y Horn, 2009). Para cada horizonte, se seleccionaron 300 agregados.

Determinación de la curva de retención de agua y de contracción de los agregados de suelo

La determinación de la curva de retención de agua (curva pF), se realizó en agregados (Hartge y Horn, 2009) de cada horizonte (n = 20), los cuales fueron envueltos en un hilo textil previo a su saturación y enumerados para evitar el contacto directo al manipularlos. Los agregados, fueron saturados por ascenso capilar, para luego ser equilibrados a tensiones de agua de -10, -20, -30, -60 hPa (en bandejas de arena) y -330 hPa (en cámara de presión). En cada tensión se registró el peso de los agregados (BEL, modelo M4202, precisión 0,01 g).

Finalizado el ciclo de la curva pF, los agregados fueron saturados y sumergidos en una resina denominada SARAN F310 (mezclada con MEK: Metil etil ketona) que se caracteriza por ser flexible e impermeable al agua (en su estado líquido), pero permeable al vapor de agua, lo cual permite evaluar la deformación del agregado conforme pierde agua (Dörner *et al.*, 2013). Cada vez que el agregado se envuelve en SARAN, se registra

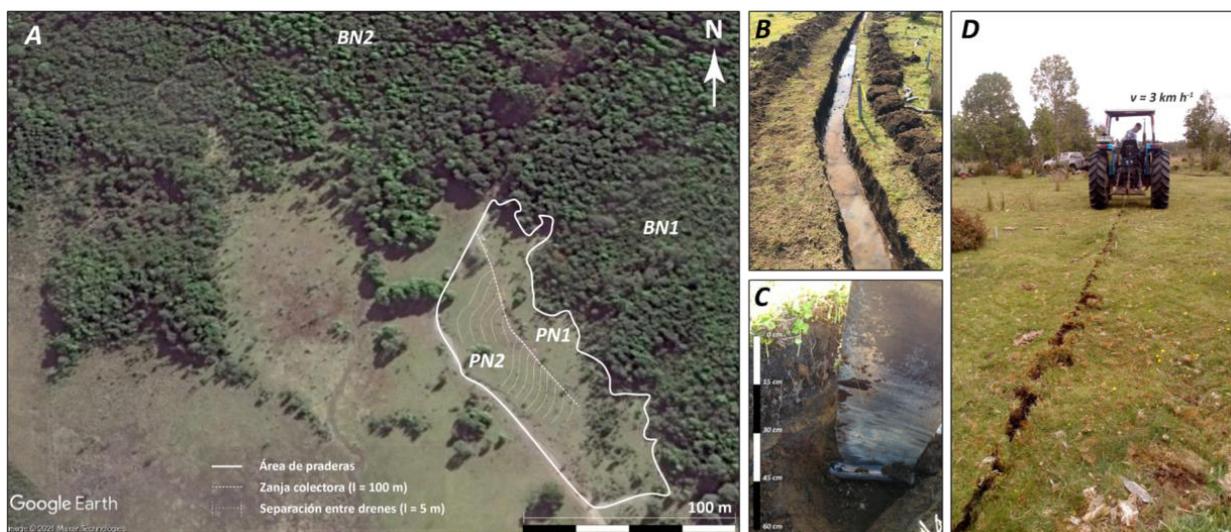


Figura 1. Componentes del diseño experimental. Usos de suelo (A), zanja colectora (B), profundidad de arado topo (C) e implementación de drenajes topo (D).

Figure 1. Experimental design components. Land Uses (A), collector ditch (B), mole drain deep (C) and mole drainage implementation (D).

el peso equivalente al gasto de resina. Esta acción se repitió tres veces para cubrir completamente el agregado. Una vez seca la resina, se registró la variación de densidad del agregado, a través del principio de Arquímedes. Se registró el cambio en la masa y volumen del agregado hasta alcanzar una peso y volumen constante. Finalmente, los agregados son secados a 105 °C por 24 horas lo que permitió determinar su densidad aparente (Blake y Hartge, 1986).

Para cuantificar el efecto del estrés hidráulico sobre la contracción de los agregados se determinó el Coeficiente de Extensibilidad Lineal (COLE), que define la variación unidimensional en suelos desde la condición de saturación hasta el secado (Grossman et al., 1968). Para determinar el COLE, se calculó previamente el diámetro equivalente de los agregados, utilizando los datos de contracción, a través de la siguiente ecuación:

$$d = \left[\frac{6m}{\pi \times D_a} \right]^{1/3} \text{ [cm]} \quad [1]$$

Donde m es la masa (g) del agregado y D_a la densidad aparente [g cm^{-3}]. La ecuación proporciona el diámetro equivalente de una esfera que tiene la misma masa y densidad que los agregados analizados. Por lo tanto, para definir el COLE de agregados se utiliza la siguiente fórmula:

$$COLE = \frac{d_0 - d_{105^\circ\text{C}}}{d_{105^\circ\text{C}}} \text{ [-]} \quad [2]$$

Donde d_0 corresponde al diámetro de los agregados en condiciones de saturación y $d_{105^\circ\text{C}}$ luego de secado en horno a 105 °C, respectivamente.

Determinación de la resistencia mecánica de los agregados

Para evaluar la respuesta de los agregados al estrés mecánico, se utilizó el método del Crushing Test (Dexter y Kroesbergen, 1985). Se utilizaron 40 agregados por horizonte, los cuales fueron saturados a través de ascenso capilar y luego equilibrados a dos tensiones: 60 hPa en bandeja de arena para representar una condición hídrica de invierno y 30.000 hPa para una condición de sequía estival ($n = 20$ por tensión) exponiendo los agregados a un secado al aire a una temperatura constante de 25 °C hasta que no se registraron variaciones en su masa. Se determinó el diámetro promedio de cada agregado ($n = 3$), utilizando un pie de metro (Venier Caliper, 0,01 mm precisión), midiendo tres caras representativas del agregado.

La resistencia mecánica de los agregados (T) se determinó de acuerdo con Dexter y Kroesbergen (1985),

considerando la fuerza aplicada (F) y el área de acción de la fuerza (A), lo que se relaciona de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{F}{A} \text{ [kPa]} \quad [3]$$

Índice de repelencia al agua

El índice de repelencia al agua (R) de los agregados se determinó a partir del método sortividad (S) al agua y etanol (Leeds-Harrison et al., 1994). Para ello, se utilizaron 20 agregados de diámetro similar (2-3 cm), bajo dos tensiones hídricas: 60 y 30.000 hPa. La medición se realizó a través de un dispositivo, el cual utiliza una bureta con agua y otra con etanol, las que en sus extremos poseen una esponja que permite el contacto con el agregado, humectándolo a medida que el fluido (agua o etanol) infiltra hacia el interior del agregado. El recipiente que contiene el líquido se posiciona sobre una balanza de alta precisión (PRECISA 100A-300M, precisión 0,01 mg). Se registra la diferencia de masa conforme el agregado absorbe el fluido (5 veces durante 75 s). La sortividad se obtuvo calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{Qf}{4bR}} \quad [4]$$

Donde:

S [$\text{mm s}^{-1/2}$]: corresponde a la sortividad en agua (S_w) y etanol (S_e); Q : es la tasa de infiltración de agua o etanol al interior del agregado [$\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$]; f : indica la porosidad llena de aire [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; b : es un parámetro en función de la difusión agua-suelo (valor promedio 0,55) y R : corresponde al radio de la punta del infiltrómetro [mm] (Leeds-Harrison et al., 1994). Estos valores permiten determinar el índice de repelencia (R), utilizando la siguiente ecuación descrita por Tillman et al. (1989):

$$R = 1,95 * \left(\frac{S_e}{S_w} \right) \quad [5]$$

Donde R es el índice de repelencia (-), S_e es la sortividad en etanol ($\text{mm s}^{-1/2}$), S_w es la sortividad en agua ($\text{mm s}^{-1/2}$). Tillman et al. (1989) señalan que suelos que presentan un comportamiento no repelente, el valor de R no puede ser superior a 1,95 valores superiores indicarían un comportamiento repelente del suelo.

Estimación de carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico (CO) de cada horizonte se determinó por el método de combustión húmeda (Walkley y Black) de acuerdo con Sadzawka et al. (2006).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa estadístico InfoStat/L comparándose de forma independiente los factores: sitio y tensión hídrica. Se evaluó la normalidad de los datos con test de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$) y la homogeneidad de la varianza de los datos se comprobaron mediante la prueba de Levene ($p \leq 0,05$). Las diferencias entre los factores sitio y tensión hídrica se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA; $\alpha = 0,05$). Cuando los datos no presentaron una distribución normal, se normalizaron (transformados logarítmicamente). Diferencias entre medias fueron realizados con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Para evaluar el grado de asociación o dependencia lineal entre las variables se realizó un análisis de correlación de Pearson, y para identificar que variables explican la variación entre los usos de suelos y sus horizontes se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Antes de realizar el ACP, el conjunto de datos fue normalizado debido a la diferencia de magnitudes y unidades de las propiedades edáficas evaluadas. Ambos análisis estadísticos mencionados anteriormente fueron realizados con el programa R 4.0.2 (R Core Team, 2019) usando RStudio Version 1.3.1073 (RStudio, Inc., MA, USA).

RESULTADOS

Efecto del cambio de uso de suelo sobre la porosidad de los agregados

Los primeros dos horizontes (H1 y H2) de los sitios bajo bosque (BN1 y BN2) presentaron una porosidad total (PT) de los agregados mayor ($p \leq 0,05$) en comparación a los sitios bajo pradera (PN1 y PN2). Estas diferencias tienden a disminuir en profundidad ($p > 0,05$). La máxima PT es de 84,9 en el H1 de BN1, mientras que la menor PT fue de 47,4, en el H4 de PN2 (Figura 2A).

Tanto para el agua disponible para las plantas (ADP) como para la capacidad de aire (CA) se presentaron diferencias para todos los niveles ($p \leq 0,05$; Figura 2B). ADP varió entre 17% y 65% entre los horizontes estudiados. El suelo bajo BN1 presentó la mayor proporción de ADP en comparación con los otros sitios. En BN1 y BN2 el ADP disminuyó conforme aumenta la profundidad. Para los H2, H3 y H4 se observó que el ADP en BN1 es superior a todos los sitios ($p \leq 0,05$), mientras que para BN2 y PN1 no hay diferencias en H3 y H4 ($p > 0,05$). La CA presentó una variación entre 6% y 13%, disminuyendo en profundidad. En superficie PN2 presenta una menor CA en comparación con los demás sitios ($p \leq 0,05$) y en profundidad la CA disminuye bajo BN2 y PN1 ($p \leq 0,05$). En los H2, H3 y H5, la CA ($< 10\%$) fue similar ($p > 0,05$) entre los sitios (Figura 2C).

Efecto del secado sobre la capacidad de contracción de los agregados

El coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) disminuye de forma exponencial conforme aumenta la densidad aparente de los agregados (D_a , $p \leq 0,05$). Sin embargo, el COLE se mantiene por sobre valores de 0,09 (Figura 3A) lo que refleja una alta sensibilidad al estrés hidráulico ($COLE > 0,09$; alta capacidad de contracción debido a la pérdida de agua). Por otro lado, el COLE aumenta exponencialmente cuando aumenta CA (equivalente al volumen de macroporos) lo que determina que no exista una relación lineal (Figura 3B), sino mas bien exponencial, cuando se analiza el efecto de la densidad del suelo (D_a inicial; 0 hPa) versus la densidad el suelo (D_a final; 105 °C) (Figura 3C).

Estabilidad mecánica de los agregados bajo distintos niveles de tensión de agua

La resistencia mecánica de agregados secos (RM-30.000 hPa) aumenta exponencialmente en la medida que su diámetro ponderado disminuye (Figura 4A). Al mismo tiempo, cuando aumenta el contenido de agua en agregados que son capaces de retener mas agua a 30.000 hPa de tensión disminuye su resistencia mecánica (Figura 4B).

La resistencia mecánica evaluada a 60 hPa no presentó diferencias significativas entre uso de bosque y pradera en H2, sin embargo, cuando el suelo presenta un alto contenido de agua (60 hPa de tensión), se observó (Cuadro 1) que PN1 (40,1 kPa) y PN2 (27,6 kPa), presentaron una mayor resistencia mecánica principalmente en H1 comparado con BN1 (18,9 kPa) y BN2 (20,6 kPa). De esta manera, a medida que el contenido de humedad a 30.000 hPa es menor, la resistencia mecánica aumenta (RM-30.000 hPa; Figura 4B)

Estabilidad de los agregados y su resistencia a la humectación

El índice de repelencia al agua (R) cambió entre todos los sitios para un mismo horizonte y entre tensiones para un mismo horizonte (Figuras 5A, 5B). Sin embargo, no presentó una relación con el contenido de CO de los agregados. Los valores del índice de repelencia variaron entre 1,09 y 3,21 a 60 hPa de tensión de agua. Con el secado del suelo (30.000 hPa) la repelencia al agua aumentó entre 1,85 y 5,38 ($p \leq 0,05$). La mayor repelencia al agua ocurrió en horizontes superficiales de ambos sistemas boscosos (Figura 5B), en comparación a ambas praderas (Figura 5A). Por otro lado, el porcentaje de CO en los agregados presenta diferencias entre los sitios estudiados, especialmente en los horizontes superficiales (Figuras 5A y 5B). Mientras en estos horizontes el CO alcanza

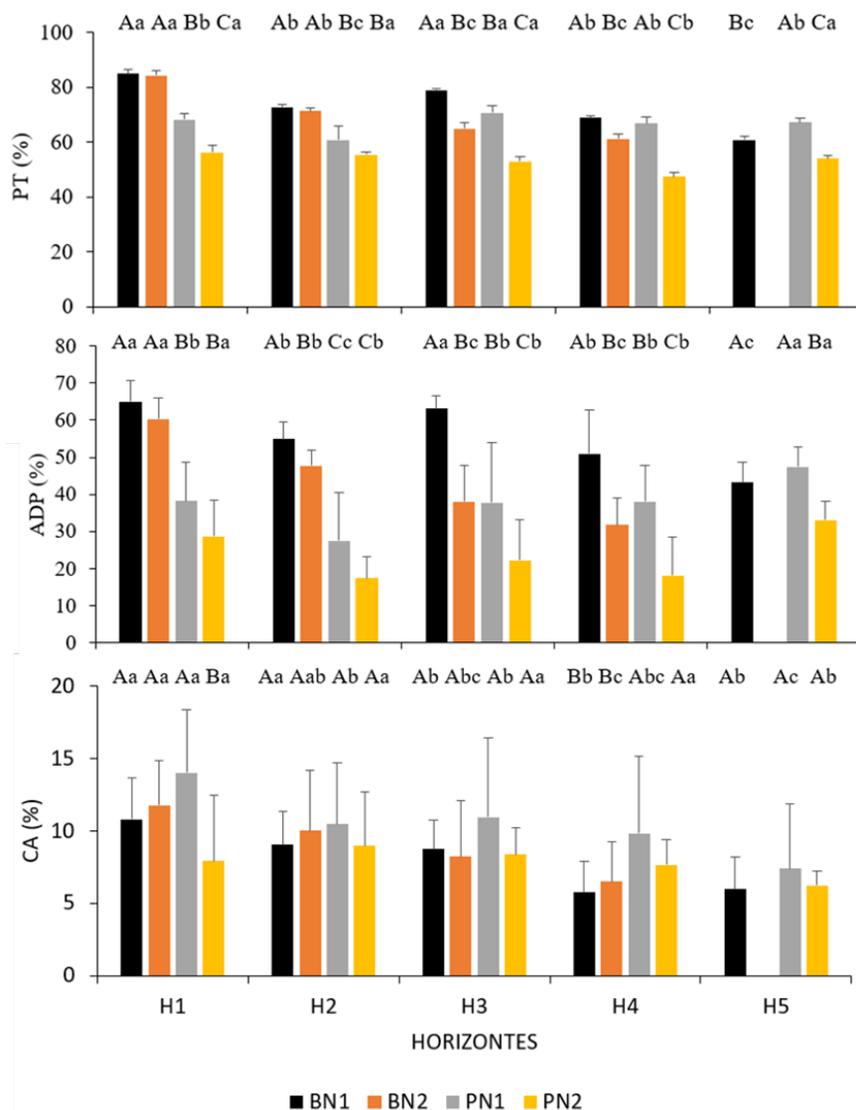


Figura 2. Porosidad total (PT), volumen de agua disponible para las plantas (ADP) y capacidad de aire (CA) para los sitios BN1 (Bosque Alerce), BN2 (Bosque Nativo Secundario), PN1 (Pradera Naturalizada 1) y PN2 (Pradera Naturalizada 2). Letras mayúsculas distintas indican diferencia entre sitios para un mismo horizonte ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas distintas denotan una diferencia entre horizontes para un mismo sitio ($p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar ($n= 23$).

Figure 2. Total porosity (PT), plant available water (ADP) and air capacity (CA) for sites BN1 (Alerce Forest), BN2 (Secondary Native Forest), PN1 (Naturalised Pasture 1) and PN2 (Naturalised Pasture 2). Capital letters indicate differences between sites for the same horizon ($p \leq 0,05$). Lowercase letters denote differences between horizons in the same site ($p \leq 0,05$). Bars indicate the standard error ($n= 23$).

valores entre 25% y 28%, en profundidad disminuye hasta alcanzar valores menores a 5% ($p \leq 0,05$).

Correlaciones positivas y significativas se observaron entre los agregados (Figura 6) que presentaron un mayor contenido de agua a la tensión de 60 hPa (WC.60) y los parámetros que determinan la estabilidad de los agregados como son la capacidad de contracción (COLE; $r = 0,53$; $p \leq 0,001$) y el índice de repelencia a la tensión de 30.000 hPa (Sorpt_ $\psi m2$; $r = 0,54$; $p \leq 0,001$). Sin embargo, agregados con un

mayor contenido de agua a WC.60 presentan una menor densidad aparente ($r = -0,56$; $p \leq 0,001$) y una correlación negativa con el diámetro ponderado de los agregados ($r = -0,35$; $p < 0,001$; Figura 6).

Agregados que retienen mas agua a la tensión de 30.000 hPa (WC.30000), se asocia con agregados que tienen una mayor capacidad de contracción ($r = -0,58$; $p \leq 0,001$) e índice de repelencia ($r = -0,4$; $p \leq 0,001$; Figura 6). Para los sitios y horizontes evaluados, se observó que agregados con un menor contenido de agua,

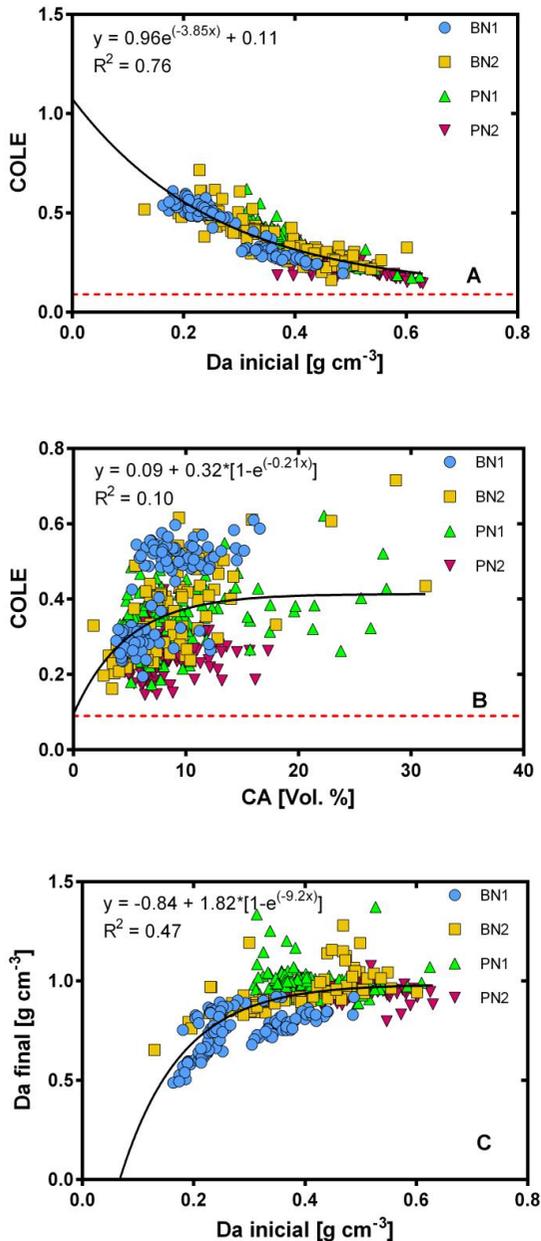


Figura 3. Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) en función de la (A) densidad aparente (D_a) de los agregados y (B) la capacidad de aire (CA). (C) Relación entre la densidad aparente inicial (volumen del suelo saturado con agua) y final (volumen de suelo luego del secado a 105 °C). BN1: Bosque Alerce (círculos azules), BN2: Bosque Nativo Secundario (cuadrados amarillos), PN1: Pradera Naturalizada 1 (triángulos verdes) y PN2: Pradera Naturalizada 2 (triángulos invertidos rojos) ($n = 20$). La línea roja segmentada indica el valor crítico para COLE.

Figure 3. Coefficient of linear extensibility (COLE) as a function of (A) aggregate's bulk density (D_a) and (B) air capacity (CA). (C) Relationship between initial (soil volume with a pore system saturated with water) and final bulk density (soil volume after oven dry at 105 °C). BN1: Alerce Forest (blue circles), BN2: Secondary Native Forest (yellow squares), PN1: Naturalised Pasture 1 (green triangles) and PN2: Naturalised Pasture 2 (red inverted triangles) ($n = 20$). The solid red line indicates the COLE critical value (0.09).

es decir, equilibrados a la tensión de 30.000 hPa presentan una correlación significativa con la densidad aparente ($r = 0,6$; $p \leq 0,001$). Además, una relación inversa ($r = -0,7$; $p \leq 0,001$) se observó entre la resistencia mecánica de los agregados con el suelo seco ($CT_{\psi m2}$) y el diámetro medio ponderado de los agregados ($Dp_{\psi m2}$) evaluados a la misma tensión de agua (WC_{30000} ; Figura 6), es decir, agregados con un bajo contenido de agua presentan un mayor diámetro ponderado, lo que se asocia a una menor resistencia mecánica por parte de los agregados evaluados a la tensión de 30.000 hPa.

Esta relación directa entre el contenido de agua del suelo y la estabilidad de los agregados también fue observada en el ACP (Figura 7), en el cual se incluyó como el CUS afecta el contenido de carbono orgánico del suelo.

Los primeros dos componentes principales (PC) del análisis explican el 48,4% de la varianza de las propiedades del suelo dado por el CUS. El 35,1% de PC1 está explicado por el mayor peso de las variables (varianza significativa) resistencia mecánica de los agregados a 30.000 hPa ($CT_{\psi m2}$), COLE, índice de repelencia y CO en ambas tensiones, agrupándose para los usos de suelo de BN1 y BN2 representados por las elipses que forman los grupos de datos (Figura 7). El PC2 explica el 13,3% de la varianza del conjunto de datos, dado por las variables CA, D_a y el contenido de carbono orgánico en ambas tensiones. Los grupos de datos de PN1 y PN2 son representados por las elipses de color verde y rosado respectivamente, y su variación es explicada con mayor peso por las variables D_a , condición seca de suelo (tensión 30.000 hPa) y el diámetro ponderado de los agregados.

DISCUSIÓN

Efectos del CUS sobre la estabilidad mecánica de los agregados de un Ñadi

El cambio de uso de los suelos Ñadi desde una condición de bosque a pradera, expone al suelo a presiones externas e internas que pueden ser causales de una alteración en el ordenamiento espacial de sus partículas y de la estructura del suelo (Thiers *et al.*, 2007). Estos suelos, reaccionan rápidamente a estreses debido a sus propiedades físicas y químicas (Ellies, 1995; Dörner *et al.*, 2015). En Andisoles, esta capacidad de resistir o adaptarse va a depender del tipo de estrés (e.g. ciclos de humectación y secado, pisoteo animal y tránsito de maquinaria) y de la duración de los eventos previos que hayan ocurrido en el suelo (Gray y Allbrook, 2002; Peng *et al.*, 2007; Dörner *et al.*, 2011). Dörner *et al.* (2013) aseguran que los Andisoles poseen una alta capacidad de contracción, lo que es ratificado en este estudio por los valores de COLE > 0,09 (Figura 3).

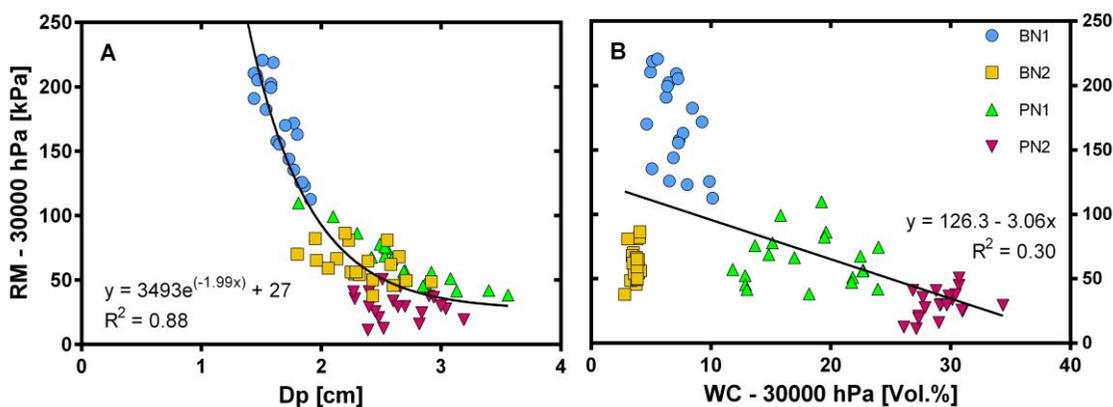


Figura 4. Resistencia mecánica de los agregados (del horizonte H1) a una tensión hídrica de 30.000 hPa en función del (A) diámetro ponderado de los agregados y (B) de su contenido volumétrico de agua a una tensión hídrica de 30.000 hPa. BN1: Bosque Alerce (círculos azules), BN2: Bosque Nativo Secundario (cuadrados amarillos), PN1: Pradera Naturalizada 1 (triángulos verdes) y PN2: Pradera Naturalizada 2 (triángulos invertidos rojos) (n= 20).

Figure 4. Mechanical strength of soil aggregates (from H1 horizon) at water tension of 30.000 hPa as a function of the (A) weighted diameter of aggregates and (B) its volumetric water content at water tension of 30.000 hPa. BN1: Alerce Forest (blue circles), BN2: Secondary Native Forest (yellow squares), PN1: Naturalised Pasture 1 (green triangles) and PN2: Naturalised Pasture 2 (red inverted triangles) (n= 20).

Cuadro 1. Resistencia mecánica y contenido de volumétrico de agua de los agregados para cada uso de suelo.

Table 1. Mechanical strength and volumetric water content of soil aggregates for each soil use.

		Uso de suelo			
		BN1	BN2	PN1	PN2
Tratamiento	Prof.	Resistencia mecánica [kPa]			
CT_ψm1	H1	18,9 ± 4,8	20,6 ± 4,5	40,1 ± 7,6	27,6 ± 9,5
	H2	28,9 ± 5,8	30,5 ± 6,2	20,1 ± 7,4	46,2 ± 16,0
	H3	24,9 ± 6,9	25,4 ± 5,5	17,6 ± 7,4	35,3 ± 9,2
	H4	41,3 ± 12,8	28,4 ± 9,7	27,5 ± 8,6	28,3 ± 5,5
CT_ψm2	H1	171,2 ± 35,2	61,9 ± 13,3	64,8 ± 20,3	29,8 ± 10,6
	H2	75,1 ± 10,2	65,7 ± 20,3	68,2 ± 25,3	24,6 ± 7,5
	H3	36,6 ± 10,3	35,9 ± 13,9	54,8 ± 25,3	23,8 ± 8,1
	H4	52,7 ± 14,4	30,3 ± 12,2	60,9 ± 16,1	22,8 ± 5,7
		Contenido de agua [Vol. %]			
WC.60	H1	78,6 ± 1,1	80,6 ± 2,5	55,4 ± 2,3	58,9 ± 4,1
	H2	83,1 ± 1,0	84,1 ± 2,2	62,3 ± 1,9	63,3 ± 2,7
	H3	81,1 ± 1,2	79,7 ± 0,0	59,8 ± 1,9	68,9 ± 7,1
	H4	70,6 ± 1,4	69,5 ± 0,0	53,1 ± 2,8	57,1 ± 3,6
WC.30000	H1	7,0 ± 1,6	3,7 ± 0,3	18,1 ± 4,2	29,2 ± 1,9
	H2	8,3 ± 2,4	4,6 ± 0,5	20,5 ± 0,0	17,9 ± 2,7
	H3	10,2 ± 1,8	5,2 ± 0,0	17,8 ± 0,0	26,4 ± 0,8
	H4	16,5 ± 2,3	11,6 ± 0,0	15,9 ± 5,2	31,2 ± 1,0

BN1: Bosque Alerce, BN2: Bosque Nativo Secundario, PN1: Pradera Naturalizada 1 y PN2: Pradera Naturalizada 2. Prof.: profundidad; CT_ψm1: resistencia mecánica de los agregados a la tensión de 60 hPa; CT_ψm2: resistencia mecánica de los agregados a la tensión de 30.000 hPa; WC.60: contenido volumétrico de agua a la tensión de 60 hPa; WC.30000: contenido volumétrico de agua a la tensión de 30.000 hPa. Valores promedios ± desviación estándar (n= 10).

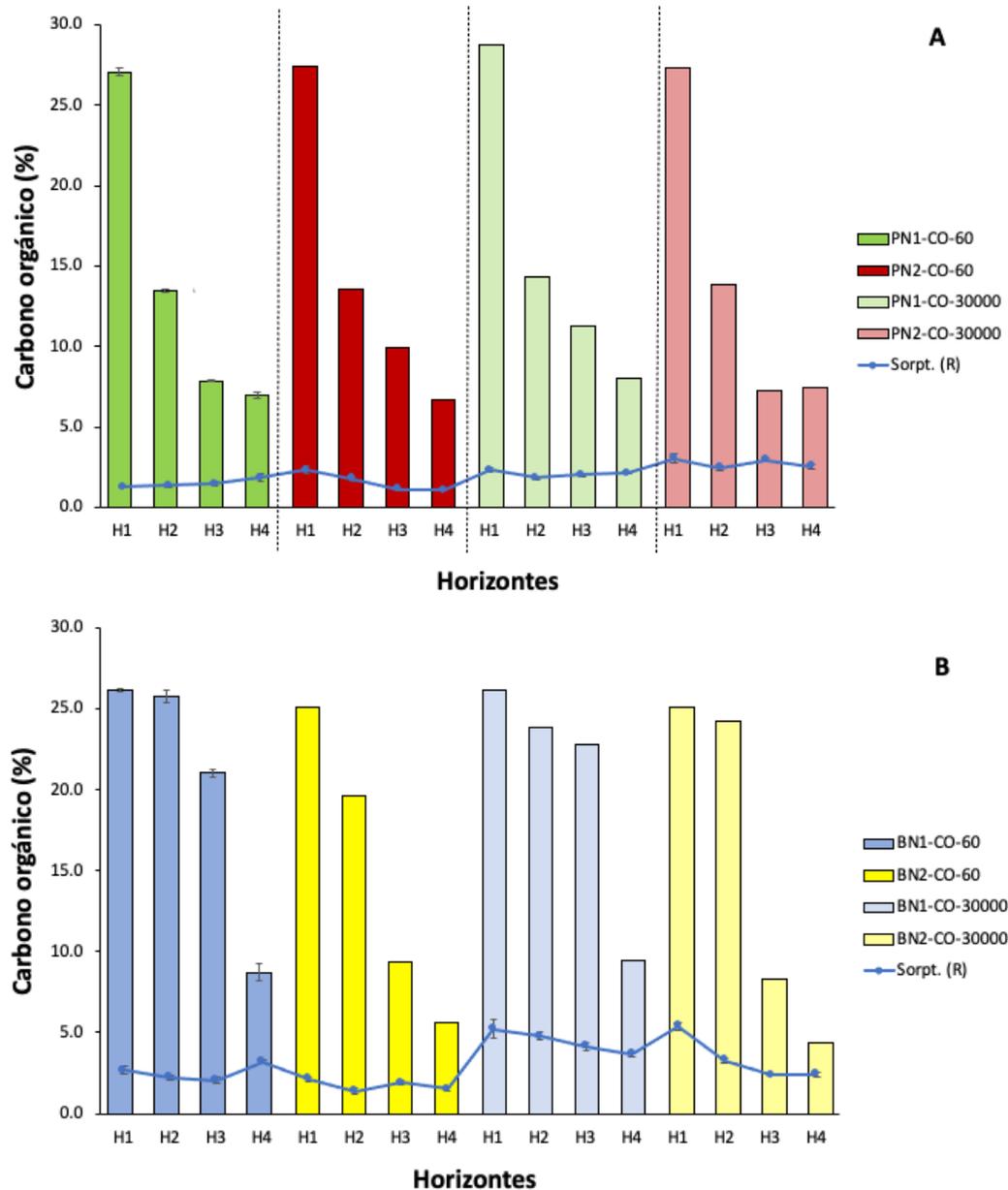


Figura 5. Índice de repelencia al agua (R) y carbono orgánico (CO) de los agregados para los sitios BN1 (Bosque Alerce), BN2 (Bosque Nativo Secundario), PN1 (Pradera Naturalizada 1) y PN2 (Pradera Naturalizada 2). (A) Barras de color verde y rojo indican tensión de 60 hPa para PN1 y PN2. Barras de color verde y rojo claro representan una tensión de 30.000 hPa para PN1 y PN2. (B) Barras de color azul y amarillo indican tensión de 60 hPa para BN1 y BN2. Barras de color azul y amarillo claro representan una tensión de 30.000 hPa para BN1 y BN2. Barras indican promedio y error estandar (n= 20).

Figure 5. Water repellency index (R) and organic carbon (CO) of aggregates for the sites for sites BN1 (Alerce Forest), BN2 (Secondary Native Forest), PN1 (Naturalised Pasture 1) and PN2 (Naturalised Pasture 2). (A) green and red bars indicate tension of 60 hPa for PN1 and PN2. Light-green and light-red bars indicate tension of 30,000 hPa for PN1 and PN2. (B) blue and yellow bars indicate tension of 60 hPa for BN1 and BN2. Light-blue and light-yellow bars represent a tension of 30,000 hPa for BN1 and BN2. Bars indicate mean and standard error (n= 20).

La resistencia de los agregados a los eventos de estrés influye directamente en la porosidad secundaria, la que se desarrolla durante los ciclos de humectación y secado (Horn y Smucker, 2005). Los agregados de un Ñadi presentan una alta capacidad de contracción en

función del volumen de agua que retienen en sus poros (humectación o secado). Al disminuir el contenido de agua de los agregados, el suelo se contrae (Figura 3B) aumentando la cohesión entre las partículas y con ello la resistencia mecánica de los agregados (Figura 4A).

Bajo cada uso de suelo, los agregados presentaron una resistencia máxima a una presión de carga, lo que depende de nivel o grado de agregación, la distribución del tamaño de los poros y la funcionalidad de estos (Horn *et al.*, 1994). En ese sentido, cabe destacar que existe una mayor resistencia en el agregado que en la matriz del suelo (Figura 6), ya que esta última presen-

ta una porosidad inter-agregado de mayor tamaño y continuidad, lo que resulta en un aumento de zonas con debilidad mecánica propensas a la deformación (Horn, 1993; Paz y Guérif, 2000).

Los agregados de los horizontes de PN2 presentan un comportamiento diferente respecto a los otros horizontes estudiados: a una mayor tensión hidráulica, se

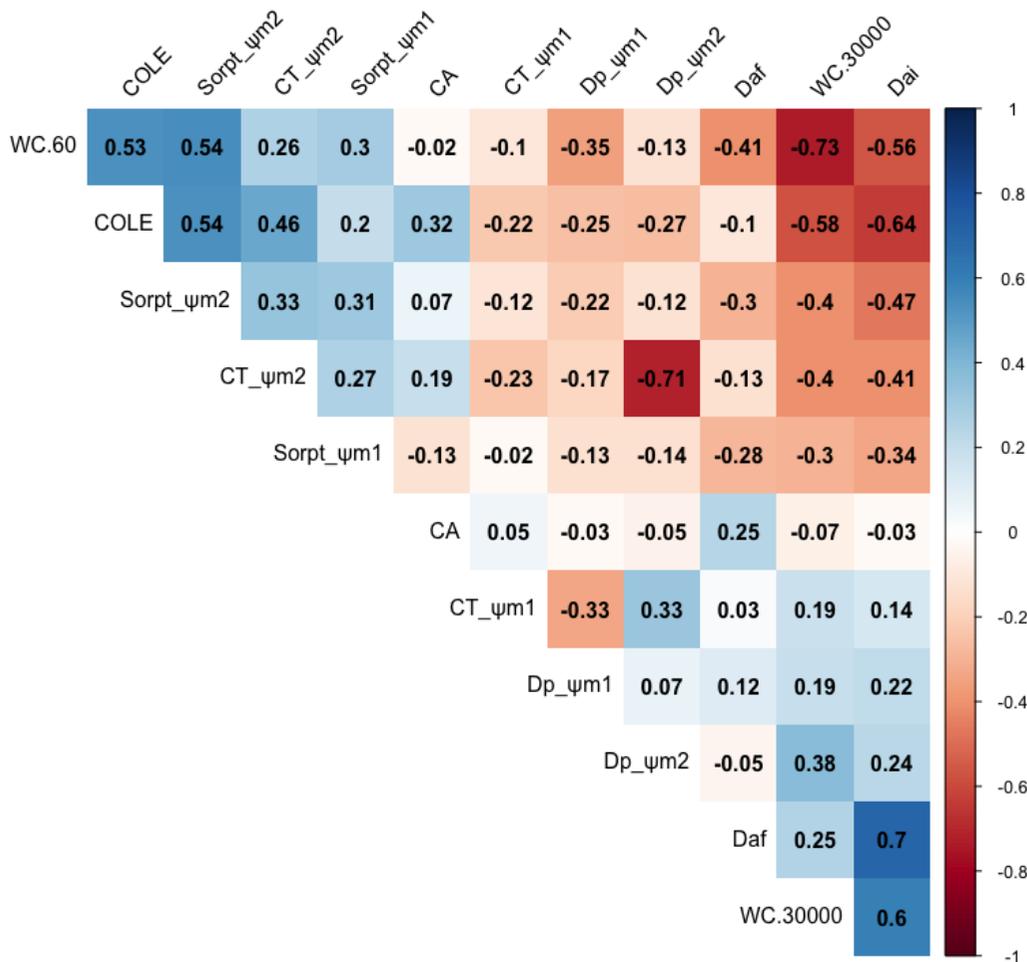


Figura 6. Matriz de correlación para las propiedades físicas evaluadas en los agregados. CT_ ψm1: resistencia mecánica de los agregados a la tensión de 60 hPa, CT_ ψm2: resistencia mecánica de los agregados a la tensión de 30.000 hPa, Dp_ ψm1: diámetro ponderado de los agregados a la tensión de 60 hPa, Dp_ ψm2: diámetro ponderado de los agregados a la tensión de 30.000 hPa, Dai: densidad aparente inicial, Daf: Densidad aparente fina, WC.60: contenido de agua a la tensión de 60 hPa, WC.30000: contenido de agua a la tensión de 30.000 hPa, Sorpt_ ψm1: Índice de repelencia de los agregados a la tensión de 60 hPa, Sorpt_ ψm2: Índice de repelencia de los agregados a la tensión de 30.000 hPa. BN1: Bosque Alerce, BN2: Bosque Nativo Secundario, PN1: Pradera Naturalizada 1 y PN2: Pradera Naturalizada 2 (n= 20). Azul y + indican una correlación directa y positiva. Rojo y - indican correlación inversa y negativa.

Figure 6. Correlation matrix for the physical properties evaluated in the aggregates. CT_ ψm1: mechanical strength of soil aggregates at a tension of 60 hPa, CT_ ψm2: mechanical strength of soil aggregates at a tension of 30.000 hPa, Dp_ ψm1: weighted diameter of aggregates at a tension of 60 hPa, Dp_ ψm2: weighted diameter of aggregates at a tension of 30.000 hPa, Dai: initial bulk density, Daf: final bulk density, WC.60: water content at a tension of 60 hPa, WC.30000: water content at a tension of 30,000 hPa, Sorpt_ ψm1: repellency index of aggregates at a tension of 60 hPa, Sorpt_ ψm2: repellency index of aggregates at a tension of 30,000 hPa. BN1: Alerce Forest, BN2: Secondary Native Forest, PN1: Naturalised Pasture 1 and PN2 Naturalised Pasture 2 (n= 20). Blue and + indicate a direct and positive correlation. Red and - indicate inverse and negative correlation.

produce una menor resistencia del agregado (Figura 4). Este comportamiento, se debe a que los Andisoles expuestos a una alta tensión hídrica, pierden su cohesión, lo que provoca que los agregados se comporten como un suelo arenoso al perder agua (Armas *et al.*, 2003).

Los agregados de los horizontes de suelo superficiales, al ser expuestos al mismo nivel tensión, alcanzaron distintos contenidos volumétricos de agua (Figura 5). Los agregados bajo PN2 alcanzaron un mayor contenido de humedad y, en consecuencia, en una menor resistencia mecánica. Por otro lado el diámetro ponderado de los agregados (D_p) tiene un rol importante en su estabilidad mecánica (Figura 3A), siendo comparable con el efecto que también tiene sobre la densidad aparente (Dörner *et al.*, 2013). Lo anterior demuestra que son varios los factores que influyen en la estabilidad mecánica de los agregados y que

presentan distintos grados de correlación (Figura 6), resaltando la necesidad de profundizar el estudio del efecto del secado sobre la contracción de los agregados y las consecuencias sobre su estabilidad, debido al potencial impacto que el drenaje puede tener sobre este tipo de suelos. Los Aquands del sur de Chile, pueden pasar entre 3-4 meses anegados con agua. Para reducir este periodo de saturación de agua en el suelo, el estado de Chile promueve el drenaje a través de la Ley 18.450 como una medida que permite habilitar estos suelos y darles un uso productivo (ODEPA, 2018). Si bien es cierto, estas son medidas que permiten hacer un uso productivo del suelo, no debe perderse de vista las potenciales consecuencias negativas que esto puede tener tomando en consideración la fragilidad los Aquands del Centro-Sur de Chile (Zúñiga *et al.*, 2019a; Dörner *et al.*, 2020).

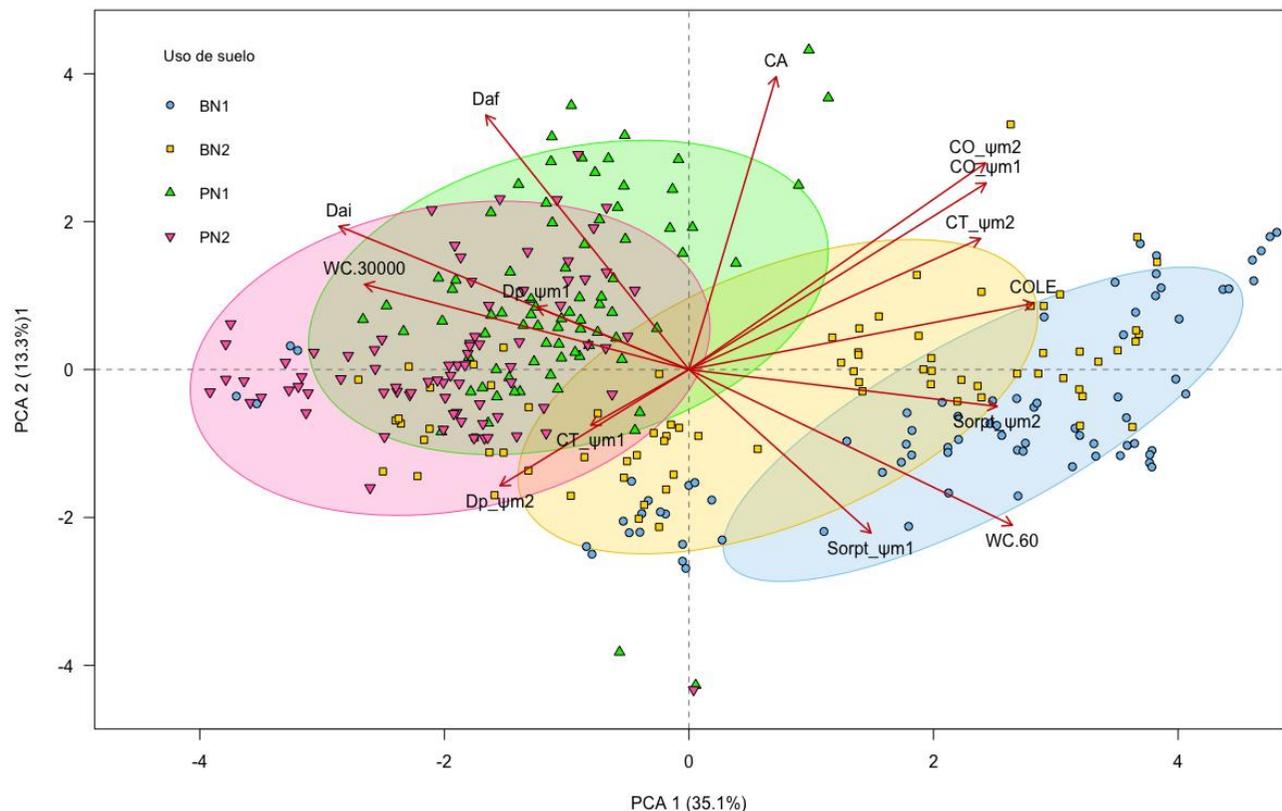


Figura 7. Análisis de componentes principales (ACP) para las propiedades físicas evaluadas en los agregados y su relación con el contenido de carbono orgánico (CO) de los agregados. CO_ψm1: contenido de carbono orgánico de los agregados a la tensión de 60 hPa, CO_ψm2: contenido de carbono orgánico de los agregados a la tensión de 30.000 hPa. BN1: Bosque Alerce (círculos azules), BN2: Bosque Nativo Secundario (cuadrados amarillos), PN1: Pradera Naturalizada 1 (triángulos verdes) y PN2: Pradera Naturalizada 2 (triángulos invertidos rojos) (n= 20).

Figure 7. Principal Component Analysis (ACP) for the physical properties evaluated in the aggregates and its relationship to the organic carbon (CO) content of the aggregates. CO_ψm1: organic carbon content of aggregates at the tension of 60 hPa, CO_ψm2: organic carbon content of aggregates at a tension of 30,000 hPa. BN1: Alerce Forest (blue circles), BN2: Secondary Native Forest (yellow squares), PN1: Naturalised Pasture 1 (green triangles) and PN2: Naturalised Pasture 2 (red inverted triangles) (n= 20).

Relación entre CUS y la capacidad de humectación de un suelo Ñadi

La porosidad total y su distribución de poros en los agregados (Figura 2), difiere entre los sitios de bosques y praderas, en particular en los primeros horizontes. mayor proporción de agua disponible para las plantas en el sitio de BN1 se relaciona con una mayor macroporosidad, la cual facilita el ingreso de aire al sistema poroso de los agregados cuando el suelo se seca (Rabot et al., 2018).

La repelencia de los agregados al agua aumenta con el secado del suelo en todos los sitios y horizontes, a excepción del H1 en PN2 (Figura 5). Dec et al. (2017) indicaron que a medida que aumentó la tensión hídrica incrementó también la resistencia a la humectación (Figura 6), siendo mayor en los primeros 5 centímetros (BN2, PN1 y PN2) cuando el suelo alcanzó un contenido de agua que corresponde a una tensión mayor al punto de marchitez permanente (PMP, pF 4,2). Tillman et al. (1989) plantearon que cuando un suelo se seca, las partículas orgánicas exponen sitios apolares que se ubican en la entrada y salida de los poros, cubriendo a las partículas minerales, dificultando la humectación. Este fenómeno ocurre con mayor frecuencia en los horizontes superficiales de bosques, mientras que en los suelos bajo pradera su frecuencia es menor y/o los componentes orgánicos son de otro tipo.

Independiente de la tensión de agua, todos los horizontes bajo el renoval de *F. cuppresoides* mostraron ser repelentes al agua ($R > 1,95$), es decir, son suelos hidrofóbicos (Tillman et al., 1989). En los otros sitios, la hidrofobia se manifestó a 30.000 hPa de tensión. Esta diferencia entre las tensiones y los usos de suelo obedece a que los sitios bajo bosque presentaron una mayor proporción de macroporos, favoreciendo el ingreso de burbujas de aire, las cuales impiden el ingreso continuo del agua por los poros (Tuller et al., 1999). Lo anterior, sumado a presencia de un horizonte orgánico compuesto por la hojarasca del renoval de Alerce, favoreció esta repelencia al agua (Jara, 2015).

Carbono orgánico y su relación con la estabilidad mecánica de los agregados según su uso

La materia orgánica del suelo juega un papel importante en la formación de agregados estables y en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo (Stevenson y Schnitzer, 1982; Aguilera, 2000; Ellies et al., 2005; Rabot et al., 2018). Se ha demostrado que los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) promueven la formación de agregados estables y con efectos más persistentes (Swift, 1991; Wei et al., 2020). En ese sentido, Ellies et al. (2005) y Peng et al. (2015) mencionan que la estabilidad estructural y la humectabilidad del suelo (o repelencia al agua) están relacionadas con la

materia orgánica, así como se puede ver en la Figura 7, donde los usos de suelo BN1 y BN2 están agrupados por dichas variables, influyendo en la capacidad de contracción de los agregados del suelo (COLE). Bajo coberturas boscosas, los Andisoles, presentan una mayor repelencia al agua al compararse con suelos bajo coberturas pratenses (Ellies et al., 2005).

Ellies et al. (1996) reportaron que las sustancias orgánicas disueltas en la solución del suelo tienen la capacidad de moverse a través de los poros, trasladando compuestos orgánicos hacia el interior del agregado, lo cual se observó en ambos renovales, donde la gran porosidad ($> 80\%$) facilitó el movimiento de agua y compuestos orgánicos en el perfil, aumentando la repelencia al agua en las paredes de los agregados (Figura 7). Estos compuestos orgánicos trasladados se componen principalmente de sustancias aromáticas cíclicas, grasas o resinas, que según Ellies et al. (1996), se encuentran a menudo en cantidades muy pequeñas pero que se ubican en posiciones estratégicamente efectivas como en la sección proximal o distal de los poros, favoreciendo la repelencia.

De esta manera, variables como el contenido de carbono orgánico del suelo (Clunes et al., 2014), la capacidad de contracción (Zuñiga et al., 2019b), la resistencia mecánica (Dörner et al., 2020) y el contenido de agua a una tensión definida (Valle et al., 2018) son indicadores útiles para determinar los cambios en la estabilidad estructural de los agregados posterior a un cambio de uso del suelo. Estos cambios pueden ser de carácter temporal o permanente, y dependerán de la resistencia y resiliencia del suelo (Lal, 1997; Seybold et al., 1999; Dörner et al., 2011; 2020). Por lo anterior, los resultados obtenidos también dependerán del tipo de suelo que se analice.

CONCLUSIONES

El CUS de un Ñadi (Aquand) desde un bosque nativo secundario a una pradera naturalizada genera estreses mecánicos (compactación) e hidráulicos (mayor secado) que alteran las propiedades físicas de los agregados del suelo. El secado, provoca contracción y un incremento en la densidad aparente de los agregados, disminuyendo el espacio poroso destinado al almacén de agua. Esto favorece la resistencia mecánica a la tracción a escala de agregados y la estabilidad mecánica del suelo Ñadi a escala de perfil.

De esta manera, los principales cambios fueron observados en los agregados recolectados en los horizontes superficiales de los suelos bajo bosque nativo, lo que refleja el historial de uso del suelo. La transición desde bosque nativo a pradera natural reduce el contenido de CO en los horizontes superficiales de PN1 y PN2, lo que mejora la capacidad de humectación del suelo (menor repelencia al agua). Además, dichos cambios contribu-

yen a disminuir la capacidad de contracción del suelo, su estabilidad estructural y la resistencia mecánica de los agregados, afectando negativamente la capacidad de resiliencia del suelo. De esta manera, además de considerar fines productivos en la intensificación de los suelos Ñadi, es necesario definir indicadores físicos de calidad de suelo que reflejen estabilidad y funcionalidad de un suelo Ñadi previo al cambio de uso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto FONDECYT 1130546. Los autores agradecen a los propietarios del Predio Chaqueihua, Don Alfredo Núñez y Sra. Elba, por su excelente disposición para llevar a cabo ensayos en el sitio de estudio, al personal del Laboratorio de Física de Suelos Achim Ellies Sch., y al Laboratorio de Química de Suelos de la Universidad Austral de Chile.

REFERENCIAS

- Aguilera, S., 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Repositorio académico Universidad de Chile. Boletín N° 14, pp. 77-85.
- Armas, S., Hernández, J., Regalado, C., 2003. Evaluación de la retracción en suelos volcánicos cultivados y su relación con algunas propiedades físicas, en: Álvarez, J., Marinero, P. (Eds.), Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo N° 6 - ZNS'03. Vallalodid, pp: 125-130.
- Blake, G., Hartge, K., 1986. Bulk Density, in: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition), Madison. pp. 363-375.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. Estudio Agrológico X Región. Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos. Publicación CIREN N° 123, Santiago, Chile.
- Cobos, F., 2010. Efecto del cambio de uso de un Andisol sobre la estabilidad mecánica de sus agregados. Tesis Lic. Agr. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 38 p.
- Clunes, J., Navarro, J., Pinochet, D., 2014. Variación temporal del contenido de materia orgánica en dos suelos volcánicos bajo diferentes manejos agrícolas. Agro Sur 42 (3), 1-14. <https://doi.org/10.4206/agrosur2014.v42n3-01>
- Dec, D., Zúñiga, F., Thiers, O., Paulino, L., Valle, S.R., Villagra, V., Tadich, I., Horn, R., Dörner, J., 2017. Water and temperature dynamics of Aquands under different uses in southern Chile. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 17 (1), 141-154. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000011>
- Dexter, A., Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. Journal of Agricultural Engineering. 31, 139-147. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6)
- Dörner, J., Dec, D., 2007. La permeabilidad del aire y la 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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000200001>
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., Horn, R., 2011. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. Soil and Tillage Research, 115, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.07.002>
- Dörner, J., Dec, D., Sáez, C., Peng, X., Ivelic-Sáez, J., Zúñiga, F., Seguel, O., Horn, R., 2013. Shrinkage properties of different managed Andisols as function of aggregate scale. Agro Sur 41 (1), 1-9. <https://doi.org/10.4206/agrosur2013.v41n1-01>
- Dörner, J., Huertas, J., Cuevas, J. G., Leiva, C., Paulino, L., Arumí, J. L., 2015. Water content dynamics in a volcanic ash soil slope in southern Chile. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 178 (4), 693-702. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500112>
- Dörner, J., Horn, R., Dec, D., Wendroth, O., Fleige, H., Zúñiga, F., 2017. Land use dependent change of soil mechanical strength and resilience of a shallow volcanic ash soil in Southern Chile. Soil Science Society of America Journal. 81 (5), 1064-1073. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.11.0378>
- Dörner, J., Horn, R., Uteau, D., Rostek, J., Zúñiga, F., Peth, S., Dec, D., Fleige, H., 2020. Studying the soil pore physical resistance and resilience of a shallow volcanic ash soil subjected to pure cyclic loading. Soil and Tillage Research. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104709>
- Ellies, A., Mac Donald, R., 1989. Las propiedades físico-mecánicas en los suelos que afectan su drenaje, en: Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo (Eds.), Los suelos de drenaje restringido. Boletín N° 9, SCHCS, pp. 46-63.
- Ellies, A., 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. Bosque 16 (2), 101-110.
- Ellies, A., Grez, R., Ramírez, C., 1995. Potencial de humectación y estabilidad estructural de suelos sometidos a diferentes manejos. Agricultura Técnica 55 (3-4), 220-225.
- Ellies, A., Grez, R., Ramírez, C., 1996. Efecto de la materia orgánica sobre la capacidad de humectación y las propiedades estructurales de algunos suelos de la zona centro sur de Chile. Agro Sur 24 (1), 48-58.
- Ellies, A., Ramírez, C., Mac Donald, R., 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. Catena 59 (1), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2004.05.005>
- Gray, C., Allbrook, R., 2002. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. Geoderma. 108, 287-29. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00136-2)
- Grossman, R., Brasher, B., Franzmeier, D., Walker, J., 1968. Linear extensibility as calculated from natural clod bulk density measurements. Soil Science Society of America Journal 32, 570-573.
- Haller, P., Dec, D., Zúñiga, F., Thiers, O., Ivelic, J., Horn, R., Dörner, J., 2015. Efecto del estrés hidráulico y mecánico sobre la resistencia y resiliencia funcional del sistema poroso de un Ñadi (Aquands) bajo distintos usos de suelo. Agro Sur 43 (2), 41-52. <https://doi.org/10.4206/agrosur2015.v43n2-06>

- Hartge, H., Horn, R., 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden, vol. 4. Praxis Messmethoden Auswertung, Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.
- Horn, R., 1993. Mechanical properties of structured unsaturated soils. *Soil Technology* 6, 47–75.
- Horn, R., Lebert, M., 1994. Chapter 3 - Soil Compactability and Compressibility, in: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, pp. 45–69.
- Horn, R., Smucker, A., 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.002>
- Jara, D., 2015. Acumulación de carbono en un bosque siemprevverde y una pradera natural, en condiciones de suelo Ñadi (aquands) en la región de Los Lagos, Chile. Tesis Ingeniero Forestal, Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. 46 p.
- Lal, R., 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment 43, 81–107. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00036-6)
- Lal, R., 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7, 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Leeds-Harrison, P., Youngs, E., Uddin, B., 1994. A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 45 (3), 269–272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00509.x>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), 2018. Programa de suelos degradados (SIRSD). <https://www.odepa.gob.cl/temas-transversales/agricultura-sostenible/programa-de-suelos-degradados-sirsd>.
- Paz, A., Guérif, J., 2000. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units. *Advances in GeoEcology* 32, 22–31.
- Peng, X., Horn, R., Smucker, A., 2007. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*. 71, 1095–1104. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0156>
- Peng, X., Horn, R., Hallet, P., 2015. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. *Soil and Tillage Research* 146, 1–3.
- R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M. L., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para suelos chilenos. Serie de Actas INIA no. 34. Santiago, Chile.
- Seybold, C., Herrick, J., Brejda, J., 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164 (4), 224–234.
- Stevenson, I., Schnitzer, M., 1982. Transmission electron microscopy of extracted fulvic and humic acids. *Soil Science* 133, 179–185.
- Swift, R.S., 1991. Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation, in: Wilson, W.S. (Ed.), *Advances in soil organic matter research: The impact on agriculture and the environment*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K. pp. 153–162.
- Thiers O., Gerding, V., Lara, A., Echeverría, C., 2007. Variación de la napa freática en un suelo ñadi bajo diferentes tipos vegetacionales, X Región, Chile, en: Libro de actas de Eco Reuniones. Primera reunión sobre forestación en la patagonia EcoForestar 2007. CIEFAP, Argentina. pp. 259–266.
- Tillman, R., Scotter, D., Wallis, M., 1989. Water-repelling and its Measurement by using Intrinsic Sorptivity. *Australian Journal of Soil Research* 27, 37–44.
- Tuller, M., Or, D., Dudley, L., 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configuration in angular pores. *Water Resources Research*. 35, 1949–1964. <https://doi.org/10.1029/1999WR900098>
- Urbanek, E., Hallett, P., Feeney, D., Horn, R., 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140 (1), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.001>
- Valle, S.R., Dörner, J., Zúñiga, F., Dec, D., 2018. Seasonal dynamics of the physical quality of volcanic ash soils under different land uses in southern Chile. *Soil and Tillage Research* 182, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.018>
- Wei, Y., Wu, X., Zeng, R., Cai, Ch., Guo, Z., 2020. Spatial variations of aggregate-associated humic substance in heavy-textured soils along a climatic gradient. *Soil and Tillage Research* 197, 104497. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104497>
- Zúñiga, F., Dec, D., Valle, S.R., Thiers, O., Paulino, L., Martínez, O., Seguel, O., Casanova, M., Pino, M., Horn, R., Dörner, J., 2019a. The waterlogged volcanic ash soils of southern Chile. A review of the "Ñadi" soils. *Catena* 173, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.003>
- Zúñiga, F., Horn, R., Rostek, J., Peth, S., Uteau, D., Dörner, J., 2019b. Anisotropy of intensity–capacity parameters on Aquands with contrasting swelling–shrinkage cycles. *Soil and Tillage Research* 193, 101–113.