



Efecto del cambio de manejo de una pradera degradada sobre la resiliencia física de un suelo en la precordillera andina de la Araucanía

Effect of management change of a degraded pasture on the soil physical resilience in the Andean mountains of the Araucanía region

Chauveau, M.^a, Gastó, J.^b, López, I.^{c,d}, Clunes, J.^e, Dörner, J.^{d,f,*}

^a Programa de Magíster en Ciencias, Instituto de la Patagonia, Universidad de Magallanes. Casilla 113-D, Punta Arenas, Chile.

^b Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

^c Institute of Agriculture and Environment, Massey University, Private Bag 11222, Palmerston North, New Zealand

^d Centro de Investigación en Suelos Volcánicos, Universidad Austral de Chile. Casilla 567, Valdivia, Chile.

^e Escuela de Graduados, Programa Doctorado en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. Casilla 567, Valdivia, Chile.

^f Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Universidad Austral de Chile. Casilla 567, Valdivia, Chile.



2015
International
Year of Soils



International Union of Soil Science



Centro de Investigación
en Suelos Volcánicos

ARTICLE INFO

Article history:
Received 05.06.2015
Accepted 20.08.2015

Keywords:
Andisol
Pasture management
Soil recovery

Original Research Article,
Special Edition: International
Year of Soils (IYS)
Soil Science

**Corresponding author:*
José Dörner, Michelle Chauveau
E-mail address:
josedorner@uach.cl
michichauveau@gmail.com

ABSTRACT

Although there is a broad base of information about the negative effects of grazing on pastures and soil, there are few studies that recorded a positive change in soil functioning and pasture response. Such studies are relevant because they allow analyzing the impact of management strategies on the pasture and soil. The aim of this study was to evaluate the recovery of physical properties of an Andisol in the short term, after the implementation of sustainable pasture management. Soil samples were collected at 5 cm deep in an Acrudoxic Melanudand next to the Andes in grasslands under different grazing management in the last six years (Degraded Grassland: DG and Improved Grassland: IG) and in a site used as a control (Native Forest: NF). Chemical and physical properties as well as the mechanical and functional soil resilience were determined. Soils under pastures presented higher bearing capacity, penetration resistance and bulk density. Additionally, a decrease in coarse porosity and air conductivity was observed in soils under pastures when compared to the soil under NF, which reflects the structural differences of the soil when subjected to different uses. No significant differences were found but the observed trend showed an improvement in the physical attributes of IG when compared to DG due to changes in grazing management, expecting that these differences will be accentuated in a larger period of time.

RESUMEN

Mientras existe una amplia base de información respecto a los efectos negativos del sobrepastoreo sobre la pradera y el suelo, son escasos los estudios que registran un cambio positivo en el funcionamiento del suelo y la respuesta de la pradera. Este tipo de estudios son relevantes ya que permiten analizar el impacto de medidas de manejo sobre la pradera y el suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar la recuperación de las propiedades físicas de un Andisol, luego de implementar un manejo sustentable de la pradera en el corto plazo. Se colectaron muestras de suelo a 5 cm de profundidad en un Acrudoxic Melanudand de la precordillera Andina en praderas sometidas a distinto manejo de pastoreo en los últimos 6 años (Pradera Degradada: PD y Pradera Mejorada: PM) y en un sitio usado como referencia (Bosque Nativo: BN). Se determinaron propiedades químicas, físicas y la resiliencia mecánica y funcional del suelo. Los sitios bajo pradera presentaron la mayor capacidad de soporte, resistencia a la penetración y densidad aparente. Además, se observó una disminución en la porosidad gruesa y conductividad de aire del suelo bajo pradera, al compararlo con BN, lo que refleja diferencias estructurales de los suelos al ser sometidos a distintos usos. A pesar que no presentaron diferencias significativas, se observó una tendencia a un mejoramiento en los atributos físicos de PM al compararla con PD debido al cambio de manejo en el pastoreo, esperándose que estas diferencias se acentúen al transcurrir un lapso de tiempo mayor.

Palabras clave: Andisol, manejo de praderas, recuperación suelo.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales rubros agrícolas del Sur de Chile (38° - 43° Latitud Sur) es la producción pecuaria, donde las praderas son la principal fuente de alimento para el ganado bovino y ovino (Balocchi, 2002). En esta zona del país dominan los Andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas), en donde el 91% de las 1,3 millones de praderas son naturalizadas (INE, 2007), y un gran porcentaje de éstas tienen cierto grado de degradación afectando la producción, el entorno social y el ambiente (Amtmann *et al.*, 1999; Balocchi y López, 2007). Las praderas naturalizadas de la precordillera andina de la Región de la Araucanía en Chile están enfrentadas a diversos procesos de degradación, los cuales se han expresado como una pérdida de la productividad de dichos ecosistemas prateros (Demanet y Romero, 1988). Lo anterior, refleja una degradación de los suelos que ha conllevado a severos problemas de erosión (Ellies, 2000).

La capacidad del suelo, como sistema de sustentación vegetal, depende de las interrelaciones entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Varnero *et al.*, 2002). Prácticas agrícolas intensivas y de largo plazo pueden compactar el suelo, alterar su estructura y su capacidad de drenaje, mermar su contenido de materia orgánica, reducir su capacidad de retención de agua, reducir la disponibilidad de nutrientes y agotar el banco de semillas de especies nativas (Ellies, 2000; Greenwood y McKenzie, 2001; Chapin *et al.*, 2002). Se ha estudiado que un deterioro en la estructura del suelo aumenta la resistencia a la penetración (Dec *et al.*, 2011); además, se dificultan las labores de labranza y se reduce la capacidad del suelo de sostener vegetación (Greenwood y McKenzie, 2001), incrementando su capacidad de soporte a expensas de la disminución en su porosidad media y gruesa (Ellies, 2000). Sin embargo, el suelo es un cuerpo dinámico que tiene la capacidad de recuperarse, siempre que las alteraciones antrópicas no sean muy drásticas y tenga el tiempo suficiente para que los procesos de mantención y recuperación (resiliencia) ocurran (Lal, 1994; Dörner *et al.*, 2011; Dörner *et al.*, 2013).

La factibilidad de recuperación de un ecosistema se relaciona con su resiliencia ecológica, es decir, la tasa a la cual este sistema vuelve a un estado de referencia luego de haber sufrido alguna perturbación (Chapin *et al.*, 2002). Por ejemplo, cambios sucesionales que representan la recuperación de la estructura de una pradera después de una alteración se llama progresión y se caracteriza por un incremento en la diversidad de especies, producción y densidad de la pradera a través del tiempo (Gastó *et al.*, 1993; López y Valentine, 2003). En ese contexto, existe una estrecha relación entre la recuperación de los atributos funcionales del suelo (p. ej. capacidad de almacenamiento de agua para las plantas)

y la recuperación de una pradera (Greenwood y McKenzie, 2001), en donde la resiliencia del suelo cumple un rol relevante ya que es función de sus características intrínsecas y de la magnitud de las perturbaciones humanas (Seybold *et al.*, 1999; Zúñiga *et al.*, 2015). Factores como los ciclos de mojado y secado, el crecimiento y descomposición de las raíces de las praderas y la acción de la fauna del suelo contribuyen a la restauración de las propiedades físicas de los suelos (Greenwood y McKenzie, 2001; Horn y Smucker, 2005; Dörner *et al.*, 2011).

Se ha mostrado que un mal manejo de la pradera y del pastoreo provocan cambios negativos en la pradera y el suelo (p. ej. Greenwood y McKenzie, 2001; Dec *et al.*, 2011). Mientras ese tipo de estudios son frecuentes, son escasos los que registran un cambio positivo en el funcionamiento del suelo y la respuesta de la pradera (Dörner *et al.*, 2013). En la mayoría de los casos, se considera la fertilización de las praderas con y sin labranza del suelo (Zúñiga *et al.*, 2015), sin existir trabajos que se aboquen a analizar el impacto de medidas iniciales de manejo sobre la pradera y el suelo, esto es p.ej., la sectorización del predio, la regulación de la carga animal, el apotreramiento y manejo del pastoreo. En ese contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la recuperación en el corto plazo de los atributos físicos funcionales del suelo en la precordillera andina de la Región de la Araucanía, luego de implementar medidas iniciales de recuperación de la pradera, sin labores de labranza de suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Suelos y manejo de praderas

El estudio se realizó en el predio Hueñivales de 52,77 ha de superficie, ubicado en la comuna de Curacautín (UTM SAD 69. 19H, 263.050 - 263.720 / 5736,280 - 5.737.73), precordillera andina de la Región de la Araucanía, durante el otoño de 2009. Como indican Luzio y Casanova (2006), el suelo pertenece a la Serie Los Prados (Acrudoxic Melanudand), ubicado entre 350 y 500 m.s.n.m., desarrollado a partir de cenizas volcánicas modernas bajo un régimen de humedad údico y de temperatura méxico. Son suelos muy profundos con pendientes complejas de 4 a 15%, que descansan sobre gravas fluvio-glaciales estratificadas. Presentan una clase textural franco arenosa (60,64 ± 0,51 % de Arena, 18,75 ± 1,76 % de Limo y 20,61 ± 1,85 % de Arcilla), baja densidad aparente (< 0,9 g/cm³), alto contenido de materia orgánica, pH ácido y alta fijación de fósforo (Demanet y Romero, 1988). El clima es templado húmedo, con una temperatura media anual de 12-13 °C, precipitaciones anuales media de 1500-3000 mm y buen drenaje (Tosso, 1985).

En su estado inicial las praderas degradadas (PD), utilizando el Sistema de Clasificación de Ecorregiones descrito por Gastó *et al.* (1993), del predio estaban

fuertemente invadidas por malezas de zarza (*Rubus ulmifolius*), mosqueta (*Rosa eglanteria*) y michay (*Berberis sp.*), lo que dificultaba el pastoreo y el surgimiento de especies más nobles. Para mejorar las praderas se realizaron, anualmente y durante un periodo de 6 años, procesos de roza, quema y control químico de malezas de manera continua y complementaria sin realizar labores de labranza. Se adoptó un sistema de pastoreo rotativo de ganado bovino con razas de doble propósito. Por lo tanto, el estudio considera praderas degradadas (PD) dominadas por especies oportunistas y tolerantes como *Agrostis capillaris*, lo que refleja una condición menos favorable para especies más nobles y praderas mejoradas (PM) dominadas por especies oportunistas y competidoras como *Lolium spp*, *Holcus lanatus* y *Bromus stamineus*, lo que se relaciona con una mejor condición de pradera, incluyendo un sector bajo bosque nativo (BN) colindante con ambas praderas que sirvió como sitio de referencia (estado inicial no disturbado del suelo).

Ensayos de campo y recolección de muestras de suelo

Se determinó la resistencia a la penetración (RP) en los 2 sistemas de manejo y el control estudiados. Para ello, se usó un penetrómetro de cono (Eijkelkamp) el que registró la RP de los primeros 10 cm de suelo ($n = 164$, para PM y PD; $n = 30$, para BN).

Se recolectaron muestras disturbadas y no disturbadas de suelo. Las muestras disturbadas (3 repeticiones) fueron recolectadas para la determinación de materia orgánica, textura, densidad real, alofán y análisis químicos de fertilidad. Las muestras no disturbadas fueron recolectadas en cilindros metálicos de 110 cm³ y de 230 cm³ en los primeros 10 cm, considerando 10 repeticiones por sitio, para la determinación de: capacidad de soporte (CS), curva de retención de agua y conductividad de aire (KI).

Análisis en laboratorio

Las muestras de suelos disturbadas fueron secadas a temperatura constante (25 °C) y preparadas para determinar pH, contenido de N-mineral, fósforo (Olsen) y aluminio extractable (Al_{ext}) en acetato de amonio 1 mol/L a pH 4,8 (Sadzawka *et al.*, 2006). Además, se determinó indirectamente el contenido de alofán a partir del método descrito por Schwertmann en 1964, adaptado posteriormente por Mizota y van Reeuwijk (1989). Se determinó la materia orgánica mediante el método de oxidación de Walkley y Black (1934), textura mediante el método de Day (1965), densidad real mediante el método del pesaje sumergido (Forsythe, 1974) y densidad aparente a través del método descrito por Blake y Hartge (1986).

Para la determinación de la curva de retención de agua, los cilindros fueron saturados mediante ascenso capilar de agua con el objetivo de evitar inclusiones de aire en los poros del suelo (Hartge y Horn, 2009). Posteriormente, las muestras fueron equilibradas a los potenciales mátricos de -10, -20, -30 hPa y -60 hPa en bandejas de arena, -150, -300, -500 hPa por medio de platos cerámicos en una olla de presión. Una vez que las muestras alcanzaron un equilibrio con el potencial mátrico aplicado, se determinó el contenido gravimétrico de agua. Finalmente, las muestras fueron secadas a 105 °C por 24 h para determinar la densidad aparente (Hartge y Horn, 2009).

Para determinar la capacidad de soporte del suelo, se realizó un ensayo de consolidación mediante el uso de un odómetro (T-Controls). Las muestras de suelo fueron saturadas por ascenso capilar de agua y equilibradas hasta 60 hPa de tensión para luego ser pesadas con el fin de determinar su contenido de agua y capacidad de aire (Dörner *et al.*, 2013). A la misma tensión, se midió la conductividad de aire (KI) mediante el método de flujo estacionario (Dörner y Horn, 2006), lo que se repitió después del ensayo de consolidación (Dörner *et al.*, 2009; Vásquez *et al.*, 2012). Las muestras de suelo equilibradas fueron instaladas en el odómetro y ajustadas a un anillo odométrico. Se aplicaron cargas de 1; 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200 y 400 kPa, dejando actuar cada carga por un espacio de seis minutos, llevándose un registro de la deformación vertical ocurrida con un comparador micrométrico (precisión 0,01 mm). Luego, se procedió a realizar las descargas, las cuales correspondieron a: de 400 a 200; de 200 a 100; de 100 a 50; de 50 a 6,25; de 6,25 a 1 y de 1 a 0 kPa, efectuándose lecturas de la recuperación vertical del suelo, durante seis minutos para cada proceso de descarga. Para evaluar la capacidad de soporte se utilizó el método gráfico de Casagrande (Rico y del Castillo, 1978). Adicionalmente y en base a la información recolectada durante el ensayo se determinó el Coeficiente de Extensibilidad Lineal (COLE) de la manera que se indica a continuación (Dörner *et al.*, 2009):

$$COLE_c = (A_i - A_f)/A_f \quad (1)$$

$$COLE_d = (A_f - A_d)/A_f \quad (2)$$

donde A_i , A_f , y A_d corresponden a la altura inicial, final y de descompresión, respectivamente. $COLE_c$ indica la deformación que sufre el suelo durante la compactación, mientras que el de descompresión ($COLE_d$) corresponde a la recuperación del suelo; por lo tanto, es un índice de resiliencia mecánica de las muestras de suelo analizadas (Dörner *et al.*, 2009).

Cálculo de la resiliencia funcional de los poros del suelo.

La resiliencia funcional se determinó, según lo descrito en Dörner *et al.* (2009), de acuerdo a la habilidad del suelo para recuperar su capacidad de conducir aire, transformando los valores de conductividad en permeabilidad de aire. Para el cálculo de la resiliencia funcional de los poros (*RF*) se usó la siguiente ecuación:

$$RF = Ka(dC)/Ka(aC) \quad (3)$$

donde:

Ka = permeabilidad de aire [μm^2]; *dC* = después consolidación; *aC* = antes consolidación.

Análisis estadísticos

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres bloques. Los resultados fueron analizados para el cumplimiento de la distribución normal y homogeneidad de varianza. Luego se realizó un ANDEVA, y cuando existieron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$), se separaron las medias usando el test de LSD.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del manejo del suelo sobre algunas de sus variables químicas

Los resultados de los análisis químicos de los distintos tratamientos: PD (pradera degradada), PM (pradera mejorada) y BN (bosque nativo), muestran niveles de fertilidad acorde a suelos trumaos con distintos manejos agrícolas (Clunes *et al.*, 2014) que han recibido bajos niveles de incorporación de tecnologías, destacando el alto nivel de carbono orgánico del suelo (COS)

y que el fósforo disponible en todos los tratamientos presentan niveles ≤ 5 ppm, considerados muy bajos para la producción agrícola (Rojas, 2009).

Las diferencias observadas en el pH de los distintos tratamientos ($p \leq 0,05$) reflejan el efecto acidificante de ambos manejos realizados a estos suelos, siendo PD el manejo más acidificante. El BN en tanto muestra un cambio menor. Por otro lado, Al_{ext} que es el indicador más usado para determinar la reactividad de suelos volcánicos (Rodríguez, 1993), muestra valores que bordean los 1000 ppm, destacando que no se observaron diferencias entre los manejos y que el suelo bajo bosque presentó una alta variabilidad. Marabolí (2008), determinó que suelos que presentan niveles de Al_{ext} entre 500 y 1000 ppm, pueden ser clasificados dentro de un mismo grupo de suelos, suelos pardo arcillosos o transicionales; mientras que los trumaos presentan valores mayores a 1000 ppm. Es así, que los suelos analizados corresponderían a un mismo grupo, en base a su contenido de Al_{ext} . Este hecho permitiría confirmar que las diferencias observadas entre los tratamientos se deben al manejo del suelo.

Efecto del manejo del suelo sobre sus propiedades físicas

A pesar que la resistencia a la penetración (RP) en PD es ligeramente superior a PM, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Figura 1). El suelo bajo BN presentó valores de RP estadísticamente inferiores al compararlo con el resto de los tratamientos ($p \leq 0,001$), ya que suelos escasamente intervenidos (como los bajo BN) exhiben una baja RP y baja capacidad de soporte (Ellies, 1995). Los manejos o usos del suelo que deterioran la sustentabilidad de la estructura, se reflejan en un aumento de la consolidación y de la RP, lo cual afecta el desarrollo radical (Ellies y Contreras 1997; Borghei *et al.*, 2008) y por ende deter-

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo según su manejo.

Table 1. Soil chemical properties as a function of soil management

| Variable | PD | | PM | | BN | |
|----------------------|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|---|
| pH en agua (1:2,5) | 5,74 ± 0,04 | c | 5,88 ± 0,01 | b | 6,18 ± 0,06 | a |
| P-Olsen (ppm) | 2,19 ± 0,09 | a | 2,65 ± 0,22 | a | 1,93 ± 0,40 | a |
| Al-extractable (ppm) | 1087,93 ± 16,88 | a | 1023,77 ± 24,85 | a | 729,32 ± 152,34 | a |
| N-mineral (ppm) | 19,13 ± 5,05 | a | 25,90 ± 2,46 | a | 23,10 ± 1,07 | a |
| Alofán (%) | 5,13 ± 0,28 | c | 5,65 ± 0,11 | b | 6,60 ± 0,10 | a |
| Materia orgánica (%) | 16,10 ± 1,09 | a | 14,81 ± 0,54 | a | 18,62 ± 1,43 | a |
| Carbono orgánico (%) | 9,34 ± 0,63 | a | 8,59 ± 0,31 | a | 10,80 ± 0,83 | a |

*Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Valores promedios ± 1 error estándar (n=3).

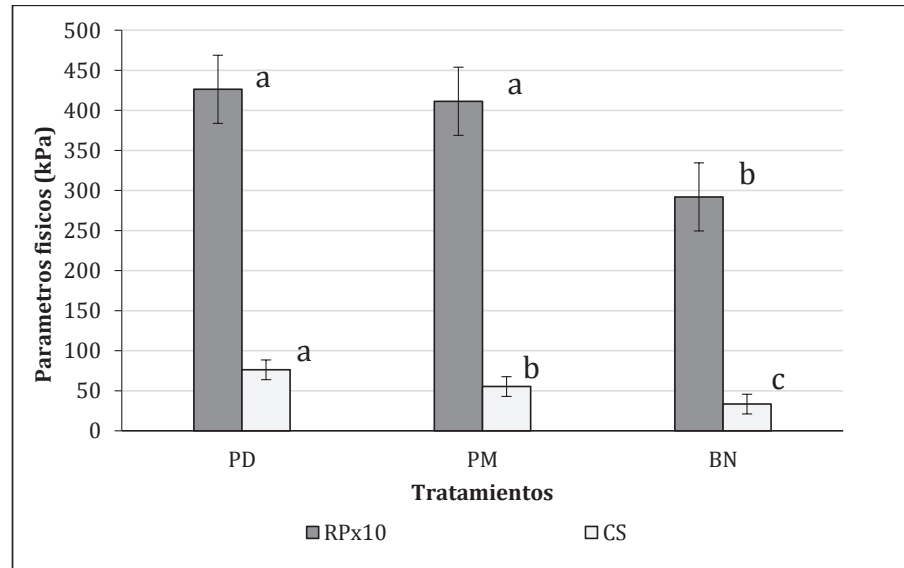


Figura 1. Efecto del manejo del suelo sobre la resistencia a la penetración (RP) y la capacidad de soporte (CS). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar (PD y PM $n = 164$; BN $n = 30$ para RP y $n = 10$ para CS).

Figure 1. Effect of soil management on penetration resistance (PR) and bearing capacity (BC). Different letters indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.001$). Bars indicate ± 1 standard error (DG and IG $n = 164$; NF $n = 30$ for PR and $n = 10$ for BC).

mina una reducción sustancial en el rendimiento de los cultivos (Gregory *et al.*, 2007). Ello obedece al impedimento mecánico en el avance de las raíces en el suelo y a la restricción del acceso del sistema radical al agua y nutrientes presentes en los suelos (Clark *et al.*, 2003).

La CS representa la máxima carga a la cual ha sido sometido un suelo a lo largo de su historia (Hartge y Horn, 2009). Los resultados confirman que existen diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,001$), en la estabilidad estructural de cada uno de los suelos (Figura 1) debido al uso y manejo histórico que se le ha dado. Así, presentan un comportamiento diferente frente a la acción de una carga, determinando la siguiente tendencia $PD > PM > BN$.

Ellies *et al.* (2000) concluyeron que la mayor compactación de los suelos ocurre inmediatamente después que el bosque nativo es eliminado, seguido por una menor compactación, la cual dependerá del tipo de manejo de suelo que se aplique y del desarrollo pedológico de los mismos. Por otro lado, la CS presenta una relación directa con la densidad aparente (D_a) y con ello al manejo del suelo (Ellies y Contreras, 1997). En este caso, los valores más altos de CS concuerdan con el incremento en las D_a (Figura 3) y RP (Figura 1) observadas. Dörner *et al.* (2009) encontraron que un cambio en el uso de los suelos lleva a un aumento en la CS y en la cohesión entre los agregados a una profundidad de 5 y 20 cm. Seguel *et al.* (2002), encontraron valores de CS en Andisoles (Series Osorno, Pemehue, Fresia y

Metrenco) similares a los de este trabajo; estos autores establecen que independiente del potencial mátrico y de la profundidad, los sitios bajo pradera tienen una mayor CS que aquellos bajo bosque, con buenas correlaciones con el estado estructural y de manejo de los suelos.

En cuanto a la porosidad del suelo y su distribución (Figura 2), sólo se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las praderas y el bosque en los poros de drenaje rápido (PDR). Se observa que BN presentó la mayor proporción de PDR, indicando que debido al menor uso y tráfico presentaría una mayor proporción de macroporos. En ese contexto, un incremento en la D_a en suelos derivados de cenizas volcánicas, con altos contenidos de arcilla no cristalina como el alofán, conduce a una reducción de su capacidad de aireación (PDR) con un incremento importante de los poros de almacenamiento de agua aprovechable para las plantas, lo que está asociado a la alta porosidad de este tipo de suelos (Ellies, 1995; Dörner *et al.*, 2009).

Resiliencia mecánica y funcional de los poros del suelo en función de su historial de manejo

La D_a determinada antes del ensayo de consolidación (a/C), (Figura 3) no presentó diferencias estadísticamente significativas entre PD y PM, pero sí entre ambas praderas y BN. Los valores máximos alcanzados después de la consolidación (d/C), tanto en PD como

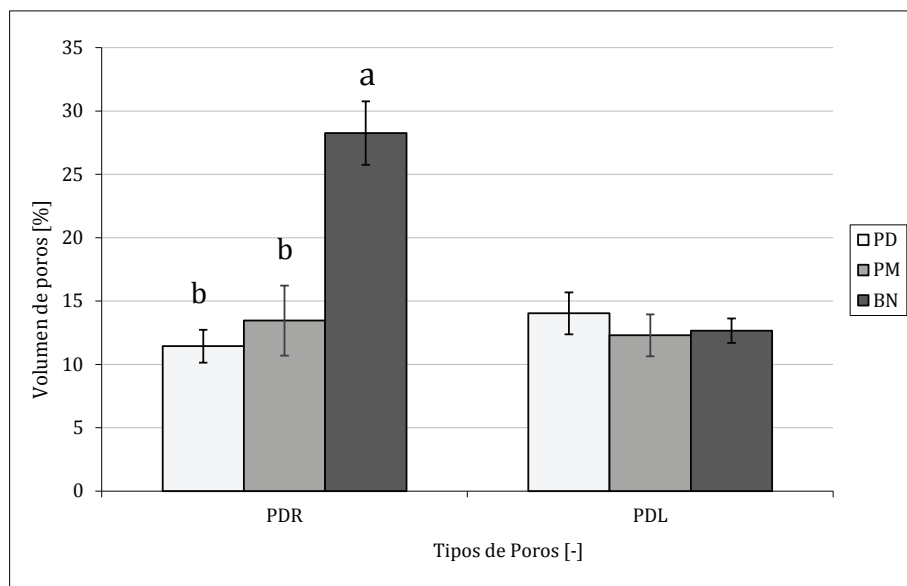


Figura 2. Distribución del volumen de poros de drenaje rápido (PDR) y poros de drenaje lento (PDL) según manejo de suelo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 4$).

Figure 2. Volume distribution of wide coarse pores (wCP) and narrow coarse pores (nCP) as a function of soil management. Different letters indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.001$). Bars indicate ± 1 standard error ($n = 4$).

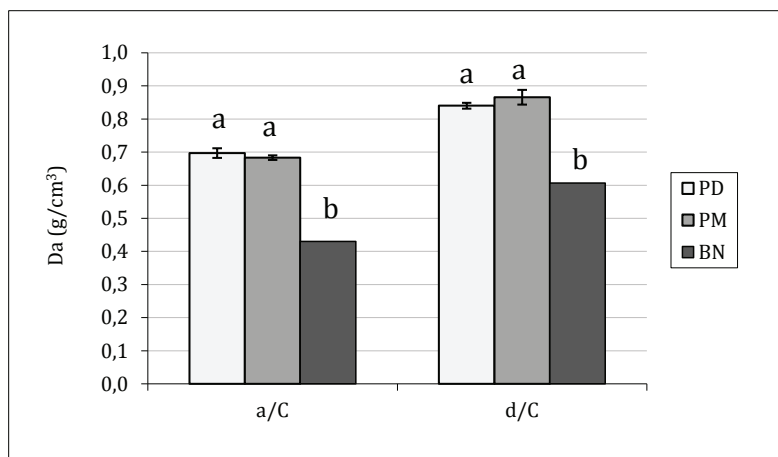


Figura 3. Densidad aparente (D_a) según manejo de suelo antes (a/C) y después (d/C) de una consolidación. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 10$).

Figure 3. Bulk density (B_d) according to soil management before (a/C) and after (d/C) consolidation. Different letters indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.001$). Bars indicate ± 1 standard error ($n = 10$).

PM, fueron muy cercanos a $0,9 \text{ g/cm}^3$ (valor máximo que puede alcanzar un Andisol, como propiedad diagnóstico); sin embargo, BN sólo alcanzó una D_a máxima de $0,69 \text{ g/cm}^3$. Los suelos bajo bosque presentan un mayor contenido de materia orgánica (MO) la cual estaría impidiendo una mayor compactación (Zhang *et al.*, 2005; Taboada, 2007). Estos resultados son ratificados por Dörner *et al.* (2011) en un Typic Durudand, en donde

se observó que suelos bajo bosque nativo presentaban una mayor capacidad de recuperación de su densidad (en comparación a suelos bajo pradera) luego de someterlos a un evento de estrés mecánico de laboratorio.

La conductividad de aire antes del ensayo de consolidación (KI a/C), es similar en ambas praderas (PM y PD: $-5,34$ y $-5,01 \text{ log m/s}$, respectivamente) lo que reflejó que ambas tenían valores de D_a (Figura 3), volumen de

macroporos (Figura 2) y una continuidad entre sus poros semejantes, lo cual deriva de su historial de manejo común (Figura 4). Sin embargo, la tendencia al aumento de Kl en PM coincide con las tendencias observadas para Da y macroporos, debido al cambio de manejo que este suelo ha experimentado en los últimos años. En el caso de BN, Kl a/C es significativamente mayor que Kl a/C de las praderas (-3,8 log m/s) lo que reflejaría que posee un mayor volumen de poros gruesos (Figura 2) y un menor grado de compactación (Figura 3). Con respecto a los valores de conductividad de aire después del ensayo

de consolidación (Kl d/C), en todos los casos se observó una reducción, reflejando luego de la compactación una disminución en el volumen de poros estructurales y un detrimento en su continuidad (Dörner *et al.*, 2009). Dörner y Dec (2007) observaron que el sobrelaboreo del suelo provoca no solo la compactación del mismo, sino que también la generación de vías preferenciales de flujo de agua o aire, alterando así la conductividad de aire.

La Figura 5 presenta las diferencias existentes entre los tratamientos con respecto a los coeficientes de extensibilidad lineal de compresión (COLEc) y de des-

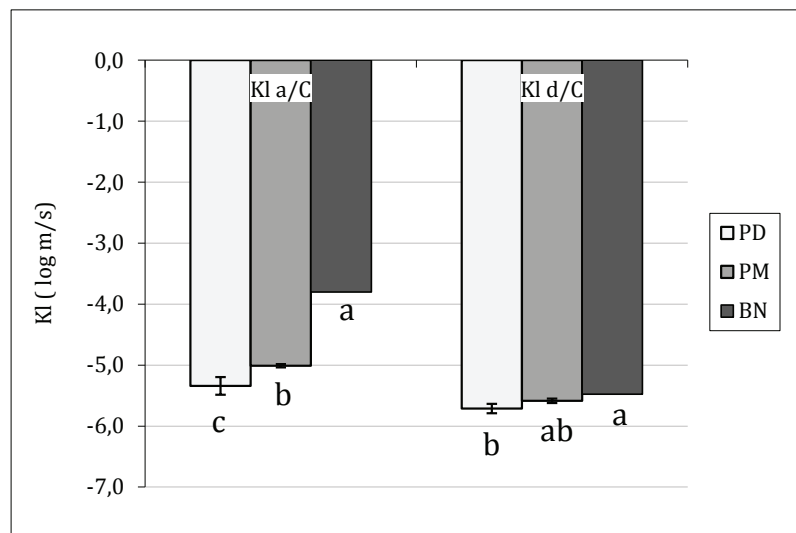


Figura 4. Conductividad de aire en función del manejo del suelo antes (Kl a/C) y después (Kl d/C) del ensayo de consolidación. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Kl a/C $p \leq 0,001$; Kl d/C $p \leq 0,05$). Barras indican ± 1 error estándar (n = 10).

Figure 4. Air conductivity as a function of soil management before (Kl a/C) and after (Kl d/C) consolidation test. Different letters indicate significant differences between treatments (Kl a/C $p \leq 0.001$; Kl d/C $p \leq 0.05$). Bars indicate ± 1 standard error (n = 10).

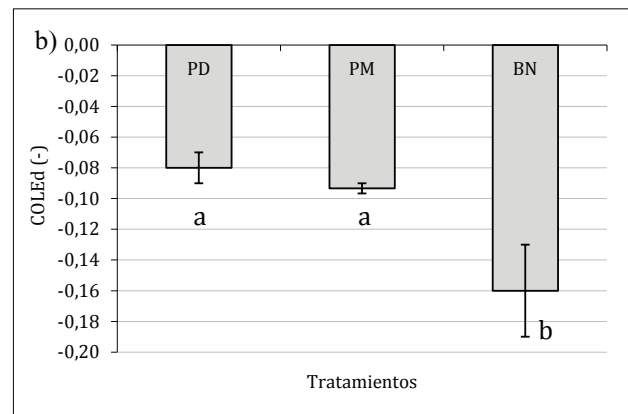
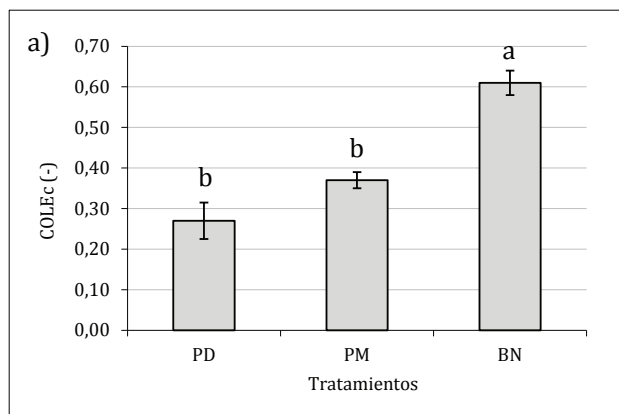


Figura 5. Coeficientes de extensibilidad lineal de compresión (COLEc) y de recuperación (COLEd) del suelo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Barras indican ± 1 error estándar (n = 10).

Figure 5. Coefficients of linear extensibility for soil compression (COLEc) and soil recuperation (COLEd). Different letters indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$). Bars indicate ± 1 standard error (n = 10).

compresión (COLEd). No existieron diferencias estadísticamente significativas entre las praderas (Figura 5a), sin embargo, la deformación registrada en el suelo bajo BN fue significativamente mayor debido a su menor Da (Figura 3) y CS (Figura 1). Diferentes manejos agrícolas afectan la capacidad de deformación del suelo, ya que la estabilidad estructural es diferente en cada suelo, debido a su grado de compactación originado por su historial de manejo, lo que concuerda con lo registrado para RP, Da y CS.

Por otro lado, al evaluar la recuperación del suelo a través del coeficiente de descompresión (COLEd), se aprecia que solo se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Figura 5b) al comparar las muestras de praderas (PD y PM) con las obtenidas de BN ($p \leq 0,001$). Esto indica que el suelo bajo bosque poseía la mayor resiliencia mecánica de los suelos analizados, lo cual podría deberse también a un mayor contenido de MO en estos suelos ya que, suelos con un mayor contenido de carbono orgánico (CO) poseen una baja resistencia a la compactación pero también una buena recuperación (Kuan et al., 2007; Zhang et al., 2005; Dörner et al., 2011). Al comparar ambos gráficos (Figura 5), se debe destacar que la recuperación del suelo es 1 orden de magnitud menor que la deformación por compactación.

La resiliencia funcional de los poros del suelo (RF) se presenta en la Figura 6 (ver ecuación 3). Se aprecia que PD y PM poseen valores de resiliencia funcional similares (0,95 y 0,92, respectivamente) y más altos que los observados para el suelo bajo bosque (0,77), lo que significa que en suelos bajo pradera los poros del suelo recuperaron sobre un 90% de su capacidad de conducción, el suelo bajo bosque, que originalmente presentaba valores de Kl más altos que en ambas praderas, sólo recuperó un 77% de su capacidad de conducción.

Esto podría reflejar que, a pesar que el suelo del bosque poseía una alta capacidad de recuperación luego de compactación (Figura 3), esto no se relaciona con su capacidad de recuperar la funcionalidad de su sistema poroso, es decir la continuidad que existe entre ellos, lo que probablemente requerirá más tiempo.

Finalmente, cabe señalar que se ha establecido que las distintas propiedades del suelo varían de forma desigual en el tiempo. La recuperación natural (resiliencia) de suelos degradados mejora sus propiedades físicas (conductividad hidráulica, volumen de macroporos, densidad aparente), sin embargo, en suelos bajo pastoreo, al excluir parcial o totalmente los animales, la recuperación se limita a los primeros 5 a 10 cm del perfil. La magnitud de los cambios va a depender del manejo del pastoreo, de las condiciones climáticas de la zona y el tiempo de utilización (Ellies et al., 1997; Drewry, 2006; Martínez et al., 2008). Strudley et al. (2008) determinaron que para propiedades relacionadas con la porosidad total del suelo se observa un cambio significativo y estable en alrededor de 10 años, mientras que el efecto en la macroporosidad se observa en 3 a 4 años, presentándose los cambios más evidentes en los primeros 8 cm del suelo. De lo anterior, es posible deducir que, el tiempo transcurrido (6 años) desde el cambio de manejo en los suelos de las praderas (PD y PM) aquí analizado, no es suficiente para que sea posible distinguir diferencias significativas entre los resultados de las variables estudiadas (Figura 1 y 3). Sin embargo, las variables de capacidad de soporte (CS) y conductividad de aire (Kl) presentan diferencias estadísticamente significativas entre los suelos bajo praderas, lo que podría deberse a las particularidades de los suelos derivados de cenizas volcánicas (alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente) y a los ciclos de humectación y secado.

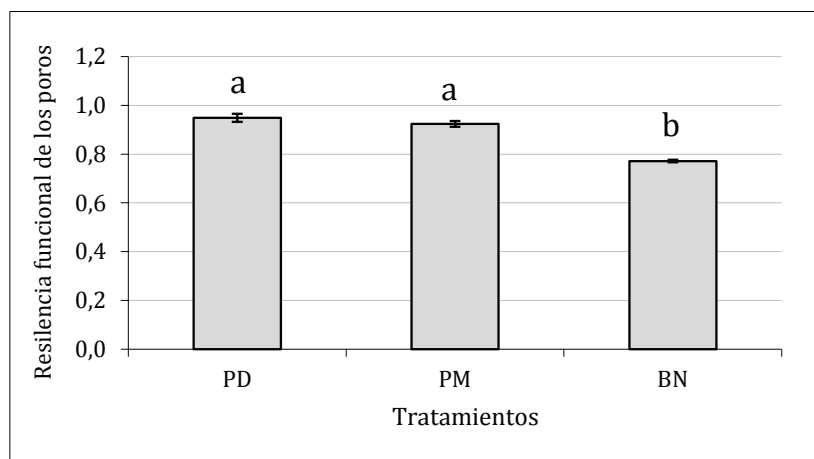


Figura 6. Resiliencia funcional (Ka d/C / Ka a/C) de los poros en función del manejo del suelo.

Figure 6. Functional resilience (Ka d/C / Ka a/C) of the soil pores as a function of soil management.

CONCLUSIONES

Es posible promover un cambio de estado positivo de un suelo degradado a través de su uso apropiado no intensivo y con un manejo de agricultura sustentable con la menor intervención de suelo posible (no labranza), permitiendo así su recuperación, expresada a través de atributos físicos y por la progresión de la pradera y sus componentes. En ese contexto, si bien no siempre se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos considerados, sí se observó una tendencia hacia un mejoramiento en las propiedades físicas del suelo y de la composición de las especies forrajeras presentes.

La pradera que permitió el desarrollo de especies más nobles y demandantes en recursos, presenta coincidentemente el suelo con las mejores características físicas (menor densidad aparente, menor resistencia a la penetración, mayor proporción de macroporos, mayor conductividad de aire), lo que refleja una progresión positiva entre la pradera y el suelo.

REFERENCIAS

- Amtmann, C., Mujica, F., Vera B., 1999. Small scale agriculture in the Los Lagos Region, Chile. Ediciones Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Balocchi, O., 2002. Praderas y recursos forrajeros en la zona sur de Chile, in: Amtman, C., Mujica, F., Vera, B. (Eds.), Pequeña agricultura en la Región de los Lagos, Chile, Valdivia, Ediciones de la Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, pp. 59-73.
- Balocchi, O., López, I., 2007. Improving naturalised pastures in the South of Chile, in: Hervé, M. (Ed.), Producción Oviná: Desde el Suelo a la Gestión. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile, pp. 13-21.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk Density, in: Klute, A., (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9. 2nd Edition, pp. 363-375.
- Borghai, A., Taghinejad, J., Mineal, S., Karimi, M., Varnamkhasati, M., 2008. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest Iran. *International Journal of Agriculture and Biology* 10, 120-123.
- Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance, in: Proceedings of the 1st International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. Vol. 3: 60-64. Cambridge, Mass., 22-26 June. Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass.
- Clark, L., Whalley, W.R., Barraclough, P.B., 2003. How do roots penetrate strong soil?. *Plant and Soil* 255, 93-104.
- 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. DOI:10.4206/agrosur.2014.v42n3-01
- Chapin, S., Matson, P., Mooney, H., 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer-Verlag, New York, USA.
- Day, P.R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis, in: Black, C.A. (Ed.), Methods of soil analysis, Part I. Agronomy 9, ASA and SSSA. Madison, Wisconsin, pp. 545-567.
- Dec, D., Dörner, J., Balocchi, O., 2011. Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(2), 293-303.
- Demaret, R., Romero, O., 1988. La pradera de la precordillera andina de la Región de la Araucanía, in: Ruiz, I. (Ed.), Praderas para Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile, pp. 520-533.
- Dörner, J., Horn, R., 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisol in the Weichselian moraine region in N Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 213-220.
- 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., Schroeren, V., Dec, D., Horn, R., 2009. Effect of Land Use on Physical Properties of a Volcanic Soil in South Chile. ISTRO 18th Triennial Conference proceeding, June 15-19. Izmir, Turkey.
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2009. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros en un Andisol (Typic Hapludand) del sur de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9(3), 190-209.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., Horn, R., 2011. Effect of land use change on Andisol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil and Tillage Research* 115-116, 71-79.
- Dörner, J., Zúñiga, F., Lopez, I., 2013. Short-term effects of different pasture improvement treatments on the physical quality of an andisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13 (2), 381-399.
- Drewry, J.J., 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114, 159-169.
- Ellies, A., 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* 16(2), 101-109.
- Ellies, A., Contreras, C., 1997. Modificaciones estructurales de un palehumult sometido a distintos manejos. *Agricultura Técnica* 57(1), 15-21.
- Ellies, A., Grez, R., Ramírez, C., 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25 (1), 51-56.
- Ellies, A., 2000. La degradación física del suelo. Boletín N°14. Simposio Proyecto Ley protección del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo-CONAMA. Chile, pp. 86-93.
- Ellies, A., Smith, R., Cuevas, J., Dörner, J., Pröschle, A., 2000. Efecto de la humedad y frecuencia del tránsito sobre la distribución de tensiones de distintos suelos. *Agro Sur* 28(2), 60-68.
- Forsythe, W., 1974. Física de suelos: manual de laboratorio. IICA, San José.
- Gastó, J., Cosio, F., Panario, D., 1993. Clasificación de ecorre-

- giones y determinación de Sitio y Condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. Ediciones Red de Pastizales (REEPAN), Quito.
- 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.
- Gregory, A., Whalley, W., Watts, C., Bird, N., Hallett, P., Whitmore, A., 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research* 89, 45-57.
- Gregory, A., Watts, C., Whalley, W., Kuan, H., Griffiths, B., Hallett, P., Whitmore, A., 2007. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *European Journal of Soil Science*. 58, 1221-1232.
- Hartge, R., Horn, R., 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart.
- 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.
- Huygens, D., Boeckx, P., van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeoscience* 2, 159-174.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2007. Censo agropecuario y forestal 2007. Resultados por comuna <http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07_comunas.php>. (acceso, 12.03.2012).
- Kuan, H., Hallett, P., Griffiths, B., Gregory, A., Watts, A., Whitmore, A., 2007. The biological and physical stability and resilience of a selection of scottish soils to stresses. *European Journal of Soil Science* 58, 811-821.
- Lal, R., 1994. Sustainable land use systems and soil resilience, in: Greenland, D.J., Szablocs, I. (Eds.), *Soil Resilience an sustainable land use*. CAB, Wallingford, pp. 41-67.
- López, I., Valentine, I., 2003. Rol de la diversidad praterense y de los grupos funcionales de especies sobre la condición de la pradera y su estabilidad. *Agro Sur* 31, 60-76.
- Luzio, W., Casanova, M., 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Universidad de Chile, Santiago.
- Marabolí, A., 2008. Proposición de factores de equivalencia de concentraciones de nutrientes entre profundidades de muestreo en suelos volcánicos. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Austral de Chile. 91p.
- Martínez, E., Fuentes, J., Silva, P., Valle, S., Acevedo, E., 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research* 99, 232-244.
- Mizota, C., van Reeuwijk, L., 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic region. ISRIC, Wageningen.
- Rico, R., del Castillo, H., 1978. La ingeniería de suelos en vías terrestre, carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Limusa, México.
- Rodríguez, J., 1993. La fertilidad de los cultivos, un método racional. Colección en Agricultura, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Rojas, C., 2009. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. <<http://www.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33852.pdf>> (acceso, 05.08.2009).
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie actas INIA N° 34, Santiago.
- Seguel, O., Ellies, A., MacDonald, R., Ramírez, C., 2002. Propiedades mecánicas en suelos sometidos a distintos usos. *Revista de Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal* 2(2), 54-61.
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., Brejda, J.J., 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164(4), 224-234.
- Strudley, M., Green, T., Ascough, J., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research* 99, 4-48.
- Taboada, M., 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía UBA. 4° Simposio de Ganadería en Siembra Directa, San Luis, Argentina, pp. 71-83. <http://www.produccionbovina.com.ar/suelos_ganaderos/49-efectos_pisoteo.pdf>
- Tosso, J., 1985. Suelos volcánicos de Chile. INIA, Santiago.
- Varnero, M., González A. P., Silva S.G., 2002. Acondicionamiento orgánico para la rehabilitación de ecosistemas con riesgos de degradación, in: Avances en restauración ambiental con énfasis en recuperación ecológica. Publicaciones misceláneas forestales N°4, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Recursos Forestales, Santiago, pp. 19-29.
- 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.
- Walkley, A., Black, I., 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.
- Zhang, B., Horn, R., Hallett, P., 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of American Journal* 69, 864-871.
- 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.