

## EFECTO DEL ESPINO (*Acacia caven* (Mol.)) SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN EXCLUSIONES DE PASTOREO

### EFFECT OF *Acacia caven* (Mol.) ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL UNDER GRAZING EXCLUSIONS

Lely Soto<sup>1\*</sup>, Esteban Leiva<sup>1</sup>, Felipe Montoya<sup>1</sup>, Óscar Seguel<sup>1</sup>, Cristian Delpiano<sup>2</sup>, Pablo Becerra<sup>2</sup>, Inao Vásquez<sup>3</sup>, Alejandro Miranda<sup>3,4</sup>, y Cecilia Smith-Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile.

<sup>2</sup> Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB), Casilla 653, Santiago, y Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Casilla 654, Valdivia, Chile.

<sup>3</sup> Laboratorio de Ecología del Paisaje Forestal, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera, Casilla 54-D, Temuco, Chile.

<sup>4</sup> Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Casilla 654, Valdivia, Chile.

\*Autor para correspondencia E-mail: lely@u.uchile.cl

#### RESUMEN

El aumento de la superficie agrícola en Chile central ha sido posible debido a un proceso de cambio de uso de suelos que antes eran bosque nativo. Este cambio tuvo un paso intermedio de reemplazo de las especies esclerófilas a matorral de *Acacia caven* (espino) y luego actividad ganadera. Este cambio de uso conlleva riesgos ambientales, entre otros por pérdida de carbono de los ecosistemas; dentro de este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del espino sobre las propiedades físicas del suelo. El estudio se realizó en dos sitios de Chile central (Pirque y Peñuelas). Se tomaron muestras de suelo a 0-10 y 10-20 cm de profundidad, bajo y fuera de la influencia del espino, evaluando: materia orgánica, densidad aparente, distribución de tamaño de poros y estabilidad de agregados. Se encontró una marcada diferencia en profundidad en ambos sitios, con un proceso de densificación en el horizonte subsuperficial. La cobertura de espino genera un beneficio directo al suelo, lo que se evidencia con un aumento de la materia orgánica, menor densidad aparente y mayor proporción de poros gruesos respecto a suelos fuera de la cobertura de espino. Sin embargo, la retención de agua aprovechable en el sitio de Pirque fue mayor fuera de la influencia del espino. La cobertura de espino también promueve una menor resistencia mecánica y una mayor estabilidad estructural, por lo que se presenta como una buena alternativa para la protección sitio específico con miras a la restauración poco asistida del bosque esclerófilo.

**Palabras claves:** ecosistema degradado, materia orgánica, pastoreo animal, restauración.

#### ABSTRACT

Cultivated land has increased in Chile as a result of a process in which native woodland sites were converted to agricultural production. This process had an intermediate step in which sclerophyll species were replaced by *Acacia caven*, prior to cattle grazing. This land use change presents environmental impacts resulting from carbon losses of ecosystems. Therefore, the main objective

of this study was to evaluate the effect of *A. caven* on the physical properties of soil. The study was conducted in two sites of central Chile (Pirque and Peñuelas). Soil samples were taken at depths of 0-10 and 10-20 cm with and without *A. caven* cover. Organic matter, bulk density, pore size distribution and aggregate stability were evaluated. A marked difference was found in terms of depth in both study sites, also observing a process of densification of the subsurface horizon. *A. caven* cover has beneficial effects on the soil because it produces increased organic matter, decreased bulk density, and a higher proportion of coarse pores compared to soils without *A. caven*. However, available water holding capacity was higher in the site that had no influence of *A. caven* in Pirque. *A. caven* cover also promotes less mechanical resistance and higher structural stability, so that it is a good alternative to specific site protection towards the restoration of sclerophyll forest.

**Key words:** degraded ecosystem, organic matter, cattle grazing, restoration.

## INTRODUCCIÓN

La presión por el uso de los recursos naturales ha producido un cambio de uso de suelo hacia usos agrícolas, lo que comprende una remoción de la vegetación nativa, con el consecuente cambio en la composición y estructura de la vegetación (Doran y Zeiss, 2000; Ramírez et al., 2003). En Chile central, las continuas presiones de uso del suelo han determinado la pérdida de gran parte del bosque nativo, siendo principalmente remplazado por matorrales dominados por *Acacia caven* (Schulz et al., 2010). Esta formación vegetal en la actualidad es la más característica de la zona central del país, y se asocia comúnmente al talajeo de ganado ovino, bovino y equino (Muñoz et al., 2008), lo que sumado a las prolongadas sequías de verano, incendios recurrentes y la alta herbívora sobre la regeneración del bosque nativo, ha generado una formación relativamente estable en el paisaje de la zona central de Chile (Van de Wouw et al 2011). Por otra parte, la mayor intensidad en el uso del recurso suelo genera un deterioro de sus propiedades, especialmente las físicas, asociadas particularmente a una disminución del carbono orgánico (Cuttle, 2008).

El pastoreo, donde se incluyen los procesos de alimentación, pisado y depósito de desechos, produce un impacto importante en las propiedades físicas del suelo (Bachmann et al., 2006), además de contribuir a la pérdida de elementos como el fósforo y partículas pequeñas por escurrimiento superficial ante una situación de erosión (Cuttle, 2008). El daño por pisoteo ocurre a través de la compactación y moldeado (amasado) de la superficie del suelo, que a su vez determinará una disminución de la macroporosidad y la tasa de infiltración (Drewry, 2006). Una alternativa para recuperar el estado, componentes y funciones de ecosistemas degradados, es implementar medidas de restauración ecológica, que consisten en la aplicación de medidas de manejo o técnicas que faciliten o aceleren la recuperación natural de un ecosistema que se ha degradado,

dañado o destruido (SER, 2015). Como medida más básica, es necesario al menos controlar los agentes de perturbación, permitiendo la recuperación autónoma de la composición, estructura y funciones del ecosistema mediante la regeneración natural (Van Andel y Aronson 2006). En el caso de la presión por ganado, es común la exclusión de áreas contra herbívoros.

La tasa de cambio del suelo en exclusiones agroforestales es lenta en el tiempo (Drewry y Paton, 2000), dependiendo en gran parte del tipo de suelo y del estado de degradación en que se encuentre. Sin embargo, en el mediano plazo es posible encontrar respuestas en las propiedades físicas del suelo (Jeddi y Chaieb, 2010), siendo más rápidos los cambios en el horizonte superficial. Drewry (2006) señala que las mejoras en las propiedades físicas del suelo en sectores excluidos por 2,5 años, sólo alcanzan a ocurrir en el horizonte superficial del suelo (hasta 4 cm), por lo que se hace necesario excluir y monitorear los cambios por un periodo de tiempo más largo para evidenciar cambios a mayor profundidad. Por otro lado, Jeddi y Chaieb (2010), encontraron un 53% de aumento en la tasa de infiltración de agua después de 6 años de establecida una exclusión, y 114% luego de 12 años. Además encontraron un aumento del contenido de materia orgánica de un 70% y 123%, a los 6 y 12 años, respectivamente.

En el caso del bosque esclerófilo, las propiedades físicas del suelo, fuertemente dependientes de la cantidad de carbono orgánico, debieran variar espacialmente bajo una cobertura arbórea respecto a una situación de pradera mediterránea anual. En este sentido, la presencia del espino en sitios degradados por el pastoreo puede ser una fuente de carbono orgánico para el suelo, pudiendo usarse en el caso de una restauración de la vegetación esclerófila. Al respecto, Muñoz et al. (2007), observaron que suelos de espinales bien preservados (coberturas de 51-80%) tenían 50% más de carbono orgánico que suelos de espinales degradados (cobertura inferior al 10%), por lo que se hace necesaria una alta cobertura del

espinal para tener importantes aportes de materia orgánica. Por otra parte, Nangarí (2012), encontró que el espino genera menos cantidad de materia orgánica en comparación con especies arbóreas del bosque esclerófilo; sin embargo, en las zonas influenciadas por la copa arbórea, hay mayores contenidos de carbono orgánico en el suelo en comparación con las zonas no influenciadas por la copa.

Ante lo expuesto, este trabajo tuvo como objetivo principal determinar el efecto que tiene el espino en las condiciones físicas del suelo, a un año de establecida una exclusión de ganado. Este trabajo corresponde a una primera evaluación de un proyecto de largo plazo que busca establecer la relación entre captura de carbono y la funcionalidad física del suelo para la recuperación del bosque nativo a través de procesos de regeneración mediante exclusiones de espinal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en dos sitios de Chile Central con presencia de bosque esclerófilo y matorral de espino (*Acacia caven* (Mol)). El primer sitio corresponde a un predio ubicado en la Comuna de Pirque de la Región Metropolitana (33°44'05" S, 70°30'57" W), con presencia de suelos profundos, bien drenados, de clase textural franco arcillo arenosa en superficie, con un aumento del porcentaje de arcilla en profundidad y pendientes menores al 5%; no se encuentra asociada a ninguna serie de suelo por encontrarse fuera de los límites de estudios cartográficos. El segundo sitio se encuentra dentro de la Reserva Nacional Lago Peñuelas ubicada en la Región de Valparaíso (33°06" a 33°13" S, 71°24" a 71°34" W), con suelos pertenecientes a la Serie Lo Vásquez (CIREN, 1997), de origen granítico de la cordillera de la costa, moderadamente profundos, con clase textural franco arcillo arenosa en superficie y variable en profundidad; las pendientes varían entre un 2% a un 50%, lo que genera diferencias en las condiciones de drenaje, separando la zona de estudio en dos sectores: uno bien drenado y otro mal drenado.

Con respecto a las variables climáticas, Pirque presenta una temperatura media anual de 10,1°C, el promedio de precipitaciones anuales es de 463 mm y el período seco se extiende durante 6 a 8 meses; anualmente se generan 1253 mm de evapotranspiración (Uribe et al., 2012). Por otra parte, Peñuelas registra una temperatura media anual de 14,8°C, con un promedio de precipitaciones anuales de 589 mm y una evapotranspiración total de 983 mm (Uribe et al., 2012). En ambos sectores había presencia de

ganado, en el caso de Pirque bovinos y equinos, en tanto en Peñuelas existe pastoreo bovino, equino y camélidos.

En octubre del año 2011 se seleccionaron y excluyeron de la zona de pastoreo animal, cuatro parcelas de 30 x 40 m<sup>2</sup> en cada sector de estudio, con una distancia mínima entre ellas de 200 metros y ubicadas adyacentes a fragmentos de bosque esclerófilo remanente, todos en zonas planas. El muestreo de suelo se realizó considerando como tratamiento la posición con respecto al espino: bajo la proyección de la copa arbórea (BE), a 1 m del eje principal y fuera de la proyección de la copa arbórea (FE), a 1 m por fuera de la proyección de la copa. Los muestreos de suelo se realizaron entre septiembre del 2012 y mayo del 2013, donde se tomaron muestras a profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, con cuatro repeticiones para cada situación.

Como caracterización general se midió la distribución de tamaño de partículas mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Sandoval et al., 2012). Se evaluó el contenido de materia orgánica mediante el método de la combustión húmeda (Sadzawka et al., 2004) y la densidad aparente (Da) con los métodos del cilindro (Dc) y del terrón (Dt) (Sandoval et al., 2012). Además se determinó la porosidad total (PT), mediante la relación  $PT = [1 - (Dac/Dr)]$ , donde Dac es la densidad aparente medida con el método del cilindro y Dr es la densidad real. Se asumió un valor característico de 2,65 Mg m<sup>-3</sup>, representativo de suelos de la zona central de Chile (Sandoval et al., 2012). Se determinó la retención de agua a diferentes tensiones en muestras no alteradas (muestreo en cilindros de 5,9 cm de radio y 5 cm de altura), mediante la cama de arena, platos y ollas de presión (Dane y Hopmans, 2002) con lo que se pudo caracterizar la distribución del tamaño de poros. Se consideraron como poros de drenaje rápido (PDR) a los mayores a 50 μm (retención de agua entre saturación y -6 kPa), poros de drenaje lento (PDL) a los poros entre 50-10 μm (retención entre -6 y -33 kPa), poros de agua útil (PAU) a los poros entre 10-0,2 μm (retención entre -33 y -1500 kPa) y poros de agua inútil (PAI) a los poros menores a 0,2 μm.

Utilizando muestras que aseguren la presencia de agregados naturales, se determinó la estabilidad de estos mediante el método de la relación de dispersión (RD), que considera la estabilidad al agua de agregados de entre 1 y 2 mm de diámetro y que se encuentra detallado en Seguel et al. (2003). En terreno y a las mismas profundidades de muestreo de las otras propiedades, se evaluó la resistencia al corte (Arroyo et al., 2013) con una veleta de torsión, asegurando que el suelo tuviera un contenido de

agua cercano a capacidad de campo.

Se calcularon los estadígrafos básicos (promedio y desviación estándar) para cada una de las propiedades medidas. Una vez comprobados los supuestos estadísticos, se realizó un análisis de varianza, comparando dentro de cada localidad los resultados entre tratamientos a una misma profundidad, así como entre profundidades de un mismo tratamiento. Cuando se encontraron diferencias significativas se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha < 0,05$ ). Finalmente, se realizaron regresiones lineales simples entre propiedades de suelo, seleccionando las más significativas ( $\alpha < 0,05$ ) y con interés para la interpretación de resultados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Textura y materia orgánica

El sitio de Pirque presentó contenidos de arcilla de 12 a 24%, limo de 35 a 48% y arena de 31 a 43%, las clases texturales fueron clasificadas como franca, con ligeros incrementos de arcilla entre los

10-20 cm respecto al horizonte superficial, aunque sin diferencias entre posiciones BE v/s FE ni entre profundidades. El sitio de Peñuelas, en tanto, presentó una clase textural predominantemente franco limosa, con niveles de arcilla de 7 a 18%, limo de 53 a 75% y arena de 15 a 23%; sólo una de las parcelas de exclusión presentó un ligero incremento de arena fina, con disminución del contenido de limo.

El contenido de materia orgánica (MO), no presentó diferencias significativas entre las dos situaciones de drenajes existentes en Peñuelas, por lo que se consideró como un único sitio (Fig.1).

La MO fue mayor entre 0 y 10 cm en todas las ubicaciones, tanto en Pirque como en Peñuelas (Fig. 1), debido al aporte que genera la vegetación en los sistemas naturales (Silva et al., 2011). De la misma forma, los contenidos de MO siempre fueron mayores en posición BE, destacando el sitio BE de Pirque entre 0-10 cm de profundidad en contraste con FE, con los mayores niveles de MO de entre todas las situaciones analizadas. Por otro lado, a pesar que el sitio de Peñuelas presentó

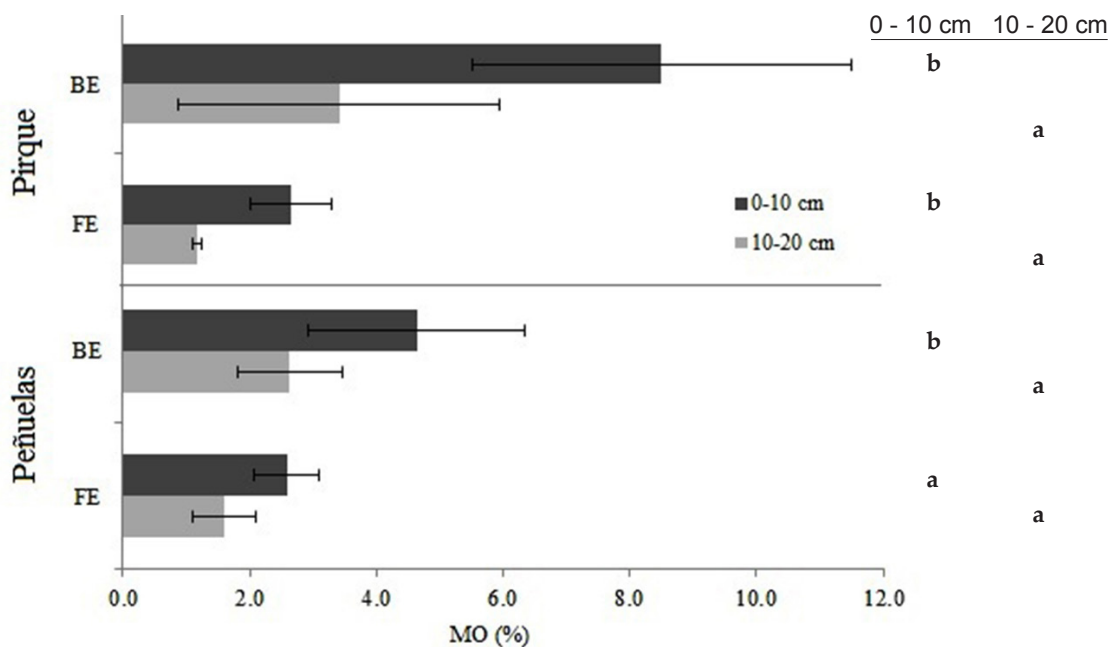


Fig. 1. Contenido de materia orgánica (% , promedio  $\pm$  desviación estándar) en ensayo de efectos del espino en las propiedades físicas del suelo.

BE: bajo la proyección de la copa arbórea; FE: fuera la proyección de la copa arbórea.

Valores con distinta letra a una misma profundidad de muestreo presentan diferencias significativas; valores con asterisco (\*) presentan diferencias significativas entre profundidades ( $\alpha < 0,05$ ).

Fig. 1. Organic matter content (% , mean  $\pm$  standard deviation) in the trial to determine the effect of *Acacia caven* on soil physical properties.

Values with different letters at the same sampling depth show significant differences; values with asterisk (\*) show significant differences between depths ( $\alpha < 0.05$ ).

una mayor variabilidad de suelos debido a los cambios en sus condiciones de drenaje, en general mostró una menor variabilidad del contenido de MO respecto al sitio de Pirque. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y entre profundidades para todas las situaciones.

La presencia del espino asegura un aporte extra de material orgánico al suelo, mediante la depositación de hojarasca, lo que se suma a una mayor acumulación de biomasa por parte de la pradera natural, producto de la prolongación del periodo entre emergencia y senescencia (Olivares et al., 1983). Un mayor contenido de MO en el suelo se traduce en un mayor crecimiento de la parte aérea y radicular de la planta, aportando mayor cantidad de materia orgánica al suelo (Muñoz et al., 2008), permitiendo una mayor retención de agua y disminuyendo la intensidad de los ciclos de humectación y secado, lo cual contribuye a la formación de una estructura de mejor calidad (Ellies et al., 1996).

### Densidad aparente, porosidad y retención de agua

Los resultados de densidad aparente determinados con el método del terrón, presentaron valores más altos que los determinados a través del método del cilindro (Tabla 1). Al realizar el muestreo utilizando el cilindro, se considera un sistema integrado por la masa de los agregados, el volumen de poros dentro de estos y el espacio poroso que existe entre ellos, mientras que el método del terrón considera el agregado como único sistema, compuesto por la masa de suelo y su respectivo volumen de poros, por lo que los valores resultantes tienden a ser mayores en comparación con el método del cilindro (Matus et al., 2002).

Tanto en Pirque como en Peñuelas, se puede destacar que los menores valores de densidad aparente (Da) se encuentran en la ubicación bajo espino (BE) y en superficie, existiendo diferencias estadísticas significativas entre profundidades

**Tabla 1. Densidad aparente medida con cilindro (Dc) y con terrones (Dt), porosidad total (PT) y retención de agua a -33 kPa y -1500 kPa (% base masa) en ensayo de efectos del espino en las propiedades físicas del suelo.**

**Table 1. Bulk density measured by cylinder (Dc) and clod (Dt) methods, total porosity (PT) and water retention at -33 kPa and -1500 kPa (% dry weight) in the trial to determine the effect of *Acacia caven* on soil physical properties.**

Sitio	Ubicación	Prof.	Dc	Dt	PT	Retención de agua	
						-33 kPa	-1500 kPa
Exclusión			Mg m <sup>-3</sup>			%	
			cm				
Pirque	BE	0-10	1,21 (± 0,03) a*	1,26 (± 0,12) a*	54,4 (± 1,0) a*	35,7 (± 7,2) a*	18,7 (± 4,5) a
		10-20	1,39 (± 0,08) a*	1,62 (± 0,07) a*	47,8 (± 3,0) a*	29,5 (± 3,7) a*	15,2 (± 3,8) a
	FE	0-10	1,33 (± 0,15) a	1,43 (± 0,10) a	49,9 (± 5,6) a+	37,0 (± 2,1) a+	15,7 (± 2,5) a
		10-20	1,43 (± 0,07) a	1,56 (± 0,08) a	45,9 (± 2,6) a+	28,3 (± 3,2) a+	15,5 (± 3,0) a
Peñuelas bien drenado	BE	0-10	1,19 (± 0,06) a*	1,41 (± 0,08) a*	55,2 (± 2,3) b*	28,6 (± 7,8) a	17,4 (± 2,0) a
		10-20	1,37 (± 0,01) a*	1,60 (± 0,06) a*	48,2 (± 0,2) b*	25,2 (± 6,8) a	13,2 (± 4,0) a
	FE	0-10	1,42 (± 0,13) b	1,44 (± 0,12) a+	46,3 (± 4,9) a	25,1 (± 5,8) a	11,4 (± 4,2) a
		10-20	1,56 (± 0,01) b	1,60 (± 0,08) a+	41,2 (± 0,5) a	21,7 (± 7,1) a	12,2 (± 5,6) a
Peñuelas mal drenado	BE	0-10	1,03(± 0,13) a*	1,19 (± 0,13) a*	61,3 (± 5,0) b*	25,3 (± 6,9) a	11,3 (± 3,0) a
		10-20	1,29(± 0,04) a*	1,47 (± 0,10) a*	51,2 (± 1,5) b*	27,4 (± 2,4) a	11,3 (± 4,1) a
	FE	0-10	1,30(± 0,03) b	1,32 (± 0,11) a+	51,0 (± 1,3) a	30,3 (± 6,3) a	17,9 (± 4,0) a
		10-20	1,39(± 0,07) b	1,62 (± 0,08) a+	47,7 (± 2,7) a	20,3 (± 6,4) a	12,1 (± 4,9) a

BE: Bajo la proyección de la copa arbórea; FE: Fuera de la proyección de la copa arbórea.

Valores con distinta letra a una misma profundidad de muestreo presentan diferencias significativas ( $\alpha < 0,05$ ). Valores con asterisco (\*) ó cruz (+) denotan diferencias significativas ( $\alpha < 0,05$ ) entre profundidades.

BE: under the tree canopy; FE: outside the tree canopy.

Values with different letters in the same sampling depth show significant differences ( $\alpha < 0.05$ ). Values with asterisk (\*) or cross (+) denote significant differences ( $\alpha < 0.05$ ) between depths.

sólo en posición BE. Esta menor Da se explica porque bajo la proyección de la copa arbórea, el tráfico es menor que fuera de ella; al respecto, Pietola et al. (2005) señalan que el impacto del pisoteo animal es mayor en suelos arcillosos, con efectos hasta 25 cm de profundidad, en tanto en suelos arenosos la densificación es sólo superficial. Además, el mayor contenido de materia orgánica favorece la mayor porosidad y por ende la menor Da (Muñoz et al., 2007). Consecuentemente, la porosidad total (PT) fue mayor cuando existe la protección de la copa arbórea, aunque sólo el sitio de Peñuelas presentó diferencias estadísticas significativas entre sitios BE y FE.

La retención de agua no mostró el comportamiento esperado en todos los sectores. En Pirque, hubo una mayor retención de agua a capacidad de campo en los primeros centímetros de la posición FE en comparación con la condición BE, lo que pudo deberse a una pérdida de poros de drenaje rápido (PDR) por la mayor compactación en ese sector y consecuente formación de poros de drenaje lento y poros de agua útil (PDL y PAU), tal como lo demostró Ellies et al. (2000) en sistemas pastoriles. El sitio bien drenado de Peñuelas presentó resultados esperados, con mayor retención de agua en posición BE que FE. Este sitio en general presentó igual o mayor retención de agua en superficie que entre 10-20 cm en respuesta a los mayores contenidos de MO, aunque la variabilidad de los resultados no permitió detectar diferencias estadísticas significativas. Por su parte, el sitio mal drenado FE de Peñuelas presentó un diferencial entre -33 y -1500 kPa menor en el sitio BE, posiblemente como consecuencia del mayor tránsito animal, que compactó el suelo y homogeneizó la porosidad.

Una mejor visión de la funcionalidad del sistema poroso la entrega la distribución volumétrica del tamaño de poros, tal como lo muestra la Fig. 2. Se puede apreciar que en Pirque, los PDR siguieron la lógica esperada (BE > FE, superficie > profundidad), considerando los resultados de contenido de MO y densidad aparente. Por otra parte, los PAU fueron mayores en superficie que entre 10-20 cm. En Peñuelas, los PDR se mantuvieron entre 12-15%, sin diferencias entre situaciones, en tanto la sumatoria de poros totales se ajustó a lo esperado, en que BE es mayor que FE y en superficie es mayor que entre 10-20 cm, aunque llama la atención la alta cantidad de PAI en BE 0-10 cm del sitio Peñuelas mal drenado.

De manera general, en Pirque no hubo diferencias significativas al comparar los tipos de poros entre zonas BE y FE, sin embargo sí se encontraron diferencias al contrastar ambas profundidades; en Peñuelas, en tanto, también hubo diferencias significativas entre

profundidades. Esto supone que la exclusión de los animales del sector de estudio ha tenido un efecto positivo en las propiedades evaluadas; sin embargo, como no ha pasado mucho tiempo desde la exclusión, este efecto es apreciable sólo en los primeros centímetros. Al respecto, Greenwood et al. (1998), encontraron mejoras en las propiedades físicas del suelo en zonas excluidas durante dos años y medio; sin embargo, estas diferencias se vieron solo en los primeros 4 cm.

Ellies et al. (2000) señalan que la conversión de sitios con bosque nativo a sistemas pastoriles provoca la principal pérdida de porosidad gruesa, en tanto la intensificación posterior del uso del suelo genera un deterioro marginal de los macroporos. La exclusión favorecería la recuperación de la estructura, con una resiliencia que aumenta a medida que el contenido de materia orgánica es mayor (Zhang et al., 2005); en este sentido, la posición BE está respondiendo con la mayor cantidad de macroporos. Sin embargo, dado que los manejos en los sitios de estudio no han sido excesivamente intensos, todas las situaciones evaluadas presentaron niveles de PDR mayores a 8%, que de acuerdo a Horn y Fleige (2009) permitirían una adecuada funcionalidad física del suelo.

#### **Relación de dispersión (RD) y resistencia al corte**

La prueba de estabilidad de agregados corresponde a un índice de dispersión en agua, por lo que los menores valores denotan una mayor estabilidad. Tanto en Pirque como en Peñuelas se pudo notar la clara diferencia que hay entre la RD entre posiciones BE y FE, particularmente en superficie (Tabla 2); sin embargo, en Pirque no hubo diferencias significativas. En los primeros 10 cm, la diferencia entre BE y FE fue mayor a 20 unidades, lo que se debe al mayor contenido de materia orgánica que genera la presencia del espino en relación a la condición fuera de la proyección de la copa arbórea (Nangarí, 2012). Este mismo comportamiento se aprecia también al comparar la RD entre profundidades, aunque con diferencias menos marcadas.

Franzluebbers (2002) planteó que la estratificación de la materia orgánica en los suelos con baja intervención (sin labranza de inversión) favorece una mayor actividad biológica, con acumulación de fuentes estables de carbono orgánico; sin embargo, la estabilidad de agregados sólo mejora en suelos de clases texturales con dominancia de limo. En este sentido, el sitio de Peñuelas, con mayor contenido de limo y menor contenido de materia orgánica que el sitio de Pirque, presentó la mejor estabilidad de agregados (menor RD), en concordancia con la exclusión de actividades productivas, por lo que resulta más relevante el

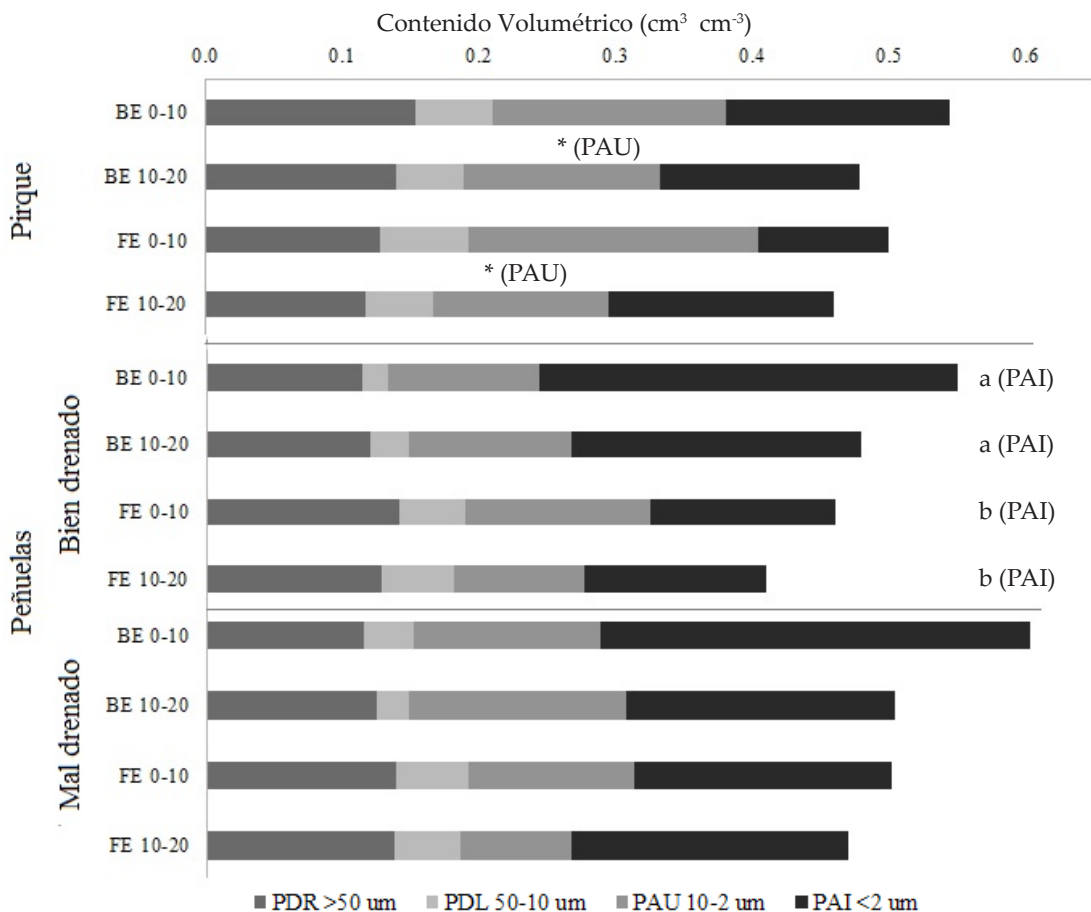


Fig. 2. Distribución de tamaño de poros en ensayo de efectos del espino en las propiedades físicas del suelo.

BE: bajo la proyección de la copa arbórea; FE: fuera la proyección de la copa arbórea; PDR: poros de drenaje rápido; PDL: poros de drenaje lento; PAU: poros de agua útil; PAI: poros de agua inútil.

El asterisco denota diferencias entre profundidades ( $\alpha < 0,05$ ), en tanto las letras distintas denotan diferencias de los PAI entre posición BE y FE a una misma profundidad ( $\alpha < 0,05$ ).

Fig. 2. Pore size distribution in the trial to determine the effect of *Acacia caven* on soil physical properties.

The asterisk denotes differences between depths ( $\alpha < 0.05$ ), while the different letters denote differences in PAI between positions BE and FE to the same depth ( $\alpha < 0.05$ ).

tipo de materia orgánica que su contenido total (Urbanek et al., 2007).

Berryman et al. (1982), afirmaron que un valor de RD menor al 30% se encuentra dentro del rango de un suelo estable. En Pirque sólo el valor superficial BE presentó microagregados estables, con lo que se puede comenzar a notar el efecto benéfico que tiene el espino en los primeros centímetros del suelo. En Peñuelas, se puede apreciar que la mayoría de los valores son menores a 30%, en respuesta a una intensidad de uso menor, con una carga animal baja previo al

establecimiento de las exclusiones. Al respecto, Ellies et al. (1985) determinaron que el aumento de la carga animal (de 0,5 a 1,5 UA ha<sup>-1</sup>) generó un incremento en la cohesión (determinada en pruebas de resistencia al corte directo) de un suelo franco limoso, no así en un suelo arcilloso, el cual se encontraba densificado, sin importar la carga animal previa.

La resistencia al corte en Pirque mostró valores más altos que en Peñuelas (Tabla 2), lo que determina la existencia de un suelo con mayor capacidad de soportar esfuerzos tangenciales,

**Tabla 2. Relación de dispersión (RD) y resistencia al corte (promedio  $\pm$  DS) para las distintas exclusiones, en ensayo de efectos del espino en las propiedades físicas del suelo. El menor valor de RD denota mayor estabilidad.**

**Table 2. Dispersion rate (RD) and shear strength (mean  $\pm$  SD) for the different exclusions in the trial to determine the effect of *Acacia caven* on soil physical properties. The lowest value of RD indicates the highest stability.**

Sitio	Ubicación	Profundidad cm	RD	Resistencia al corte
			%	kPa
Pirque	BE	0-10	18,2 ( $\pm$ 4,6) a*	100,9 ( $\pm$ 11,7) a*
		10-20	46,1 ( $\pm$ 8,5) a*	227,9 ( $\pm$ 35,1) a*
	FE	0-10	40,4 ( $\pm$ 16,9) a	141,3 ( $\pm$ 36,2) b+
		10-20	56,3 ( $\pm$ 29,0) a	305,8 ( $\pm$ 59,8) b+
Peñuelas bien drenado	BE	0-10	2,8 ( $\pm$ 0,1) a*	34,4 ( $\pm$ 9,1) a*
		10-20	18,4 ( $\pm$ 6,6) a*	97,1 ( $\pm$ 26,8) a*
	FE	0-10	31,8 ( $\pm$ 15,4) b	46,1 ( $\pm$ 5,8) a+
		10-20	41,2 ( $\pm$ 16,6) b	120,9 ( $\pm$ 16,7) a+
Peñuelas mal drenado	BE	0-10	1,2 ( $\pm$ 1,8) a*	31,3 ( $\pm$ 1,2) a*
		10-20	20,1 ( $\pm$ 2,9) a*	83,9 ( $\pm$ 17,6) a*
	FE	0-10	25,6 ( $\pm$ 15,0) b	72,3 ( $\pm$ 6,2) b+
		10-20	47,8 ( $\pm$ 2,4) b	124,3 ( $\pm$ 2,6) b+

BE: bajo la proyección de la copa arbórea; FE: fuera la proyección de la copa arbórea.

Valores con distinta letra a una misma profundidad representan diferencias significativas ( $\alpha < 0,05$ ). Valores con asterisco (\*) ó cruz (+) denotan diferencias significativas ( $\alpha < 0,05$ ) entre profundidades

Values with different letters at the same depth represent significant differences ( $\alpha < 0.05$ ). Values with an asterisk (\*) or cross (+) denote significant differences ( $\alpha < 0.05$ ) between depths.

debido a una posible mayor intervención en comparación con el sector de Peñuelas. Ellies (1995), explicó que un aumento en la intensidad de uso de un suelo, es decir, mayor tráfico, pisoteo o frecuencia de labranza, genera un aumento en los parámetros mecánicos como la resistencia al corte. Ambos sitios (Pirque y Peñuelas) mostraron diferencias significativas entre profundidades en posición BE, obteniendo los valores más bajos en los primeros 10 centímetros. Por otra parte, entre ubicaciones a una misma profundidad de muestreo, no hubo diferencias significativas en la condición bien drenada de Peñuelas, pero sí una tendencia a presentar menor resistencia BE que FE en ambas profundidades. En los casos restantes (Pirque y Peñuelas mal drenado) se puede ver el efecto de la proyección de la copa arbórea, favorecida por la exclusión de animales, con menores valores de resistencia en BE respecto a FE. En el caso de Peñuelas, los valores fueron más bajos y con menor variación que en Pirque.

Se presentó una correlación significativa ( $\alpha < 0,05$ ) entre la RD y la resistencia al corte (Fig. 3), es decir, un incremento de la resistencia mecánica en respuesta a una menor estabilidad de microagregados (mayor RD), equivalente a un estado de dispersión del suelo.

En un amplio rango de tipos de suelos, la resistencia mecánica depende de los factores que explican la agregación, básicamente clase textural y contenido de materia orgánica, siguiendo una relación lineal positiva (Fuentes et al., 2013). En este sentido, los resultados para los sitios del presente estudio, con dominancia de limo, no siguieron la tendencia esperada, ya que la resistencia al corte aumentó a medida que la estabilidad de agregados disminuyó (mayor RD).

La estabilidad de agregados es una propiedad integradora de características intrínsecas del suelo, como los contenidos de arcilla y materia orgánica. Los procesos de degradación estructural por pérdida de materia orgánica y tránsito en superficie pueden provocar disminución de la densidad aparente por efecto del amasado del suelo, y sólo los ciclos de humectación y secado posteriores generan un incremento de la densidad de los agregados, con friabilización del volumen suelo (Seguel y Horn, 2006). En este sentido, un estado de desestructuración ha generado una mayor cohesión entre las partículas (Fuentes et al., 2013), donde la acumulación de materia orgánica y su interacción con las partículas minerales aún es incipiente respecto al máximo



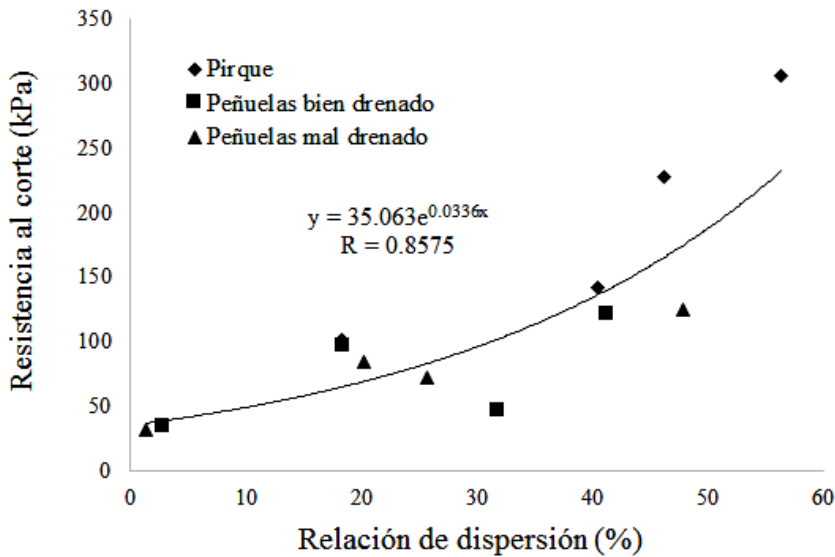


Fig. 3. Relación entre la relación de dispersión y la resistencia al corte en muestras de suelo de Pirque y Peñuelas.

Ajuste significativo ( $p < 0,05$ ).

Fig. 3. Relationship between dispersion rate and shear strength in soil samples from Pirque and Peñuelas.

Set significant ( $p < 0.05$ ).

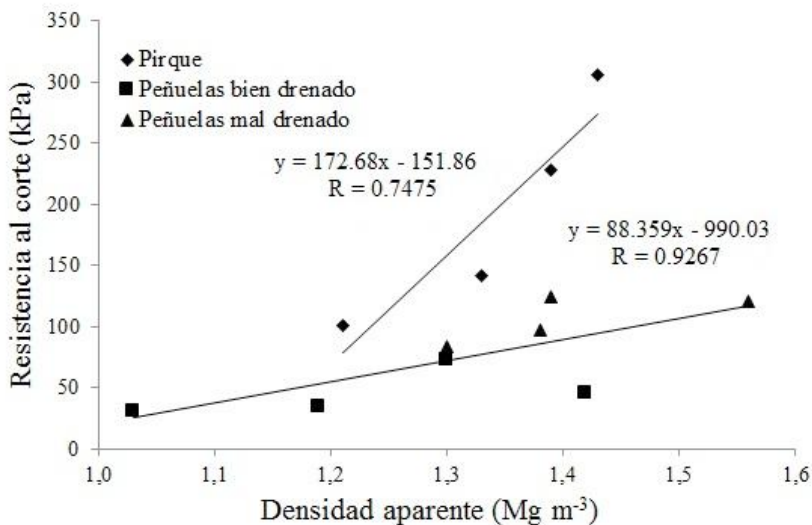


Fig. 4. Relación entre la densidad aparente y la resistencia al corte de muestras de suelo de Pirque y Peñuelas.

Fig. 4. Relationship between bulk density and shear strength of soil samples from Pirque and Peñuelas.

potencial de captura de carbono que poseerían los sitios (Virto et al., 2008).

También se observó que en ambos sectores de estudio existe una relación lineal entre la  $D_a$  y la resistencia al corte ( $\alpha < 0,05$ ), donde a mayor

$D_a$ , aumenta la resistencia al corte (Fig. 4). Esto concuerda con el estudio realizado por Seguel y Orellana (2008), quienes encontraron una relación lineal entre la densidad aparente y la resistencia mecánica del suelo, como consecuencia del

mayor encaje entre partículas sólidas. En la Fig. 4 se observa también que la resistencia del sitio de Peñuelas presenta una menor sensibilidad a los cambios de la densidad aparente.

Al ir densificándose un suelo, propiedades como la Da y la resistencia al corte irán aumentando conjuntamente; sin embargo, este aumento puede variar según distintas propiedades del suelo, como son el contenido de la materia orgánica o la estabilidad de los agregados (Seguel y Orellana, 2008). Zhang et al. (2005) propusieron un modelo reológico, en el cual la acumulación de materia orgánica en el suelo generaría una mayor elasticidad, lo que se traduce en una mayor resiliencia del mismo. El sitio de Pirque, con mayor contenido de materia orgánica, estaría experimentando este proceso, de manera que presenta una alta sensibilidad (mayor pendiente) frente a los procesos de densificación. A medida que aumenta el tiempo de exclusión y la materia orgánica interactúa con las partículas minerales, la friabilidad del suelo irá en aumento, mejorando su calidad y capacidad funcional (Stock y Downes, 2008).

Al observar los resultados, se puede concluir que el efecto del espino en el corto plazo es significativo, aunque las diferencias se generan en la superficie. Al utilizar exclusiones como estrategia de recuperación de los ecosistemas, Drewry (2006) señala que para comprobar una recuperación de las propiedades físicas del suelo es necesario monitorear su comportamiento por varios años antes de encontrar diferencias sustanciales; sin embargo, en el presente trabajo se encontraron tendencias que ameritan el estudio a largo plazo de las propiedades físicas del suelo en sitios bajo exclusión de pastoreo.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio, se puede concluir que la ubicación bajo espino (BE) mostró una mejor condición de las propiedades físicas de suelo. La proyección de la copa del espino genera cambios en las propiedades del suelo, tales como disminuciones de los valores de densidad aparente, aumento en la porosidad total, aumento en el contenido de materia orgánica, mayor estabilidad de agregados y menor resistencia mecánica. La proyección de la copa del espino también contribuye a retener una mayor cantidad de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, sin embargo estos parámetros presentaron alta variabilidad, dado que están en función de otros factores, como la clase textural y el grado de estructuración del suelo.

Dado que el presente estudio es el primero que se realiza después de menos de dos años de

instaladas las exclusiones, es necesario esperar periodos de tiempo más extensos para poder percibir mayores cambios en las propiedades del suelo, debido a la escala de tiempo a la que evolucionan estas propiedades. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta etapa permiten establecer que la exclusión genera las condiciones de suelo adecuadas para la regeneración del bosque esclerófilo, constituyendo una línea base comparativa para futuros seguimientos que se realicen en el largo plazo.

## RECONOCIMIENTOS

El presente estudio se realizó con el apoyo de Proyecto CONAF 058 PFB23, ICM 05-002.

## LITERATURA CITADA

- Arroyo, H., E. Rojas, M. Pérez-Rea, J. Horta, and J. Arroyo. 2013. Simulation of the shear strength for unsaturated soils. *Comptes Rendus Mecanique* 34:727-742.
- Bachmann, J., K. Contreras, K. Hartge, and R. Mac Donald. 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research* 87:112-118.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner, R. Swain, and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. 116 p. Formerly Advisory Paper N° 18. Reference Book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Stockholm, Sweden.
- CIREN, 1997. Estudio agrológico V Región. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Publicación CIREN N° 116. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.
- Cuttle, S.P. 2008. Impacts of pastoral grazing on soil quality. p. 33-74. In R. McDowell (ed.) *Environmental impacts of pasture-based farming*. Agresearch. Invermay Agriculture Centre, Mosgiel, New Zealand.
- Dane, J.H, and J.W. Hopmans. 2002. Water retention and storage. p. 717-720. In Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods*. Book Series N° 5. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, J., and M. Zeizz. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15:3-11.
- Drewry, J. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zeland and Australia: A review. *Agriculture, Ecosystems and Envi-*

- ronment 114:159-169.
- Drewry, J., and R. Paton. 2000. Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 43:377-386.
- Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque* 16(2):101-110.
- Ellies, A., J. Galloso, y M. Velásquez. 1985. Efectos del pastoreo sobre la resistencia al corte en un suelo Dystrandept y Palehumult. *Agro Sur* 13(2):84-90.
- Ellies, A., R. Grez, y C. Ramírez. 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* 24:48-58.
- Ellies, A., R. Horn, and R. Smith. 2000. Effect of management of a volcanic ash soil on structural properties. *International Agrophysics* 14:377-384.
- Franzluebbers, A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66:95-106.
- Fuentes, I., O. Seguel, and M. Casanova. 2013. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of central Chile. p. 72-88. In J. Krümmelbein, R. Horn, and M. Pagliai (eds.). *Soil Degradation. Advances in Geocology* 42. IUUS, Reiskirchen, Germany.
- Greenwood, K., D. Macleod, J. Scott, and K. Hutchison. 1998. Changes to soil physical properties after grazing exclusion. *Soil Use and Management* 14:19-24.
- Horn, R., and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in North-west Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102:201-208.
- Jeddi, K., and M. Chaied. 2010. Changes in soil properties and vegetation following livestock grazing exclusion in degraded arid environments of South Tunisia. *Flora* 205:184-189.
- Matus, F., A. Osorio, A. Acevedo, S. Ortega, y R. Cazanga. 2002. Efecto del manejo y algunas propiedades del suelo sobre la densidad aparente. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 2(1):7-15.
- Muñoz, C., C. Monreal, M. Schnitzer, and E. Zagal. 2008. Influence of *Acacia caven* (Mol) coverage on carbon distribution and its chemical composition in soil organic carbon fractions in a Mediterranean-type climate region. *Geoderma* 144:352-360.
- Muñoz, C., E. Zagal, and C. Ovalle. 2007. Influence of trees on soil organic matter in Mediterranean agroforestry systems: An example from the 'Espinal' of central Chile. *European Journal of Soil Science* 58:728-735.
- Nangari, A. 2012. Variación de la actividad enzimática del suelo en formaciones vegetacionales esclerófilas de la zona central de Chile. Memoria de título de Ingeniero Agrónomo, mención Ingeniería y Suelos. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Olivares, A., R. Cornejo, y J. Gándara. 1983. Influencia de la estrata arbustiva (*Acacia caven* (Mol.) Hook at Arn) en el crecimiento de la estrata herbácea. *Avances en Producción Animal* 8(1-2):19-28.
- Pietola, L., R. Horn, and M. Yli-Halla. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and Tillage Research* 82:99-108.
- Ramírez, C., A. Ellies, R. Mac Donald, y O. Seguel. 2003. Cambios en la flora y la materia orgánica desde bosques nativos a praderas antropogénicas en suelos volcánicos de la IX Región de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 3(2):1-12.
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, y M. Mora. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. p. 113. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales N° 5. Universidad de Concepción, Chillán. Chile.
- Schulz, J., L. Cayuela, C. Echeverría, J. Salas, J-M. Re, 2010. Monitoring land cover changes of dryland forest landscape of Central Chile (1975, 2008). *Applied Geography* 30(3):436-447.
- Seguel, O., e I. Orellana. 2008. Relación entre las propiedades mecánicas de suelos y los procesos de génesis e intensidad de uso. *Agro Sur* 36(2):82-92.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Strength regain in soil aggregate beds by swelling and shrinkage. *International Agrophysics* 20:161-172.
- Seguel, O., V. García de Cortázar, y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3):287-297.
- SER. 2015. Adoption of SER Primer's Definition of ER. Society for Ecological Restoration (SER). Washington, DC., USA. Available at <http://www.ser.org/resources/resources-detail-view/adoption-of-ser-primer's-definition>

- tion-of-er (Accessed April 2015).
- Silva, G., H., Lima, M. Campanha, R. Gilkes, and T. Oliveira. 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma* 167-168:61-70.
- Urbanek, E., P. Hallet, D. Feeney, and R. Horn. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma* 140:147-155.
- Uribe, J.M., R. Cabrera, A. de la Fuente, y M. Párraga. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. 232 p. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Van Andel, J. and L. Aronson. 2006. *Restoration Ecology: The new frontier*. John Willey & Sons, Oxford, United Kingdom.
- Van de Wouw, P., C. Echeverría, J.M. Rey-Benayas, and M. Holmgren. 2011. Persistent Acacia savannas replace Mediterranean sclerophyllous forests in South America. *Forest Ecology and Management* 262:1100-1108.
- Virto, I., P. Barré, and C. Chenu. 2008. Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale. *Geoderma* 146:326-335.
- Zhang, B., R. Horn, and P. Hallet. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69:864-871.