

Cambios estructurales de suelo con aplicaciones de enmiendas orgánicas en un Haplargid franco cultivado con vid

Soil structural changes by organic amendments in a loam Haplargid cultivated with vines

Seguel, O.^{a*}, Baginsky, C.^b, Contreras, A.^c, Covarrubias, J.I.^b, González, C.^d, Valenzuela, F.^a, Callejas, R.^b

^a Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos. Casilla 1004. Santiago, Chile.

^b Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Agrícola.

^c Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Pregrado.

^d Instituto Nacional de Investigación Agraria – INIA Intihuasi, La Serena, Chile.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 09.08.2020

Accepted 24.01.2022

Keywords:

Manure

Cover crops

Soil physical properties

Aggregate stability

Vitis vinifera

Original Research Article,

Special Issue: Biodiversity and crop management: key players for a productive and sustainable agriculture in temperate climatic conditions

*Corresponding author:

Oscar Seguel

E-mail address:

oseguel@uchile.cl

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the accumulated effect of crop rotations with or without manure amendment on the physical properties of the soil and its relationship with the growth of grape (*Vitis vinifera*). The investigation was carried out in Vallenar, Atacama Region in Chile, between years 2006 and 2010. In a Xerollic Haplargid belongs to Cavanca soil series, plots of 8 plants of grapevine distributed in two rows were established, defining 4 treatments: T1, control, bare soil; T2, crop rotation (rapeseed-broad bean-mustard-oats); T3 manure (12.5 Mg ha⁻¹ year⁻¹); T4, crop rotation (rapeseed-broad bean-barley-mustard) established with manure amendment (same dose of T3), with manure application on the grape row and crop rotations in the entire plots. The soil physical properties were evaluated at three depths (0-10; 10-30; 30-50 cm), while in the vine the pruning weight, the grape yield and the root growth were measured. The applications of manure (T3 and T4) promoted an increase of the soil organic matter, which resulted in an improvement of physical properties; nevertheless, the treatment that combine the use of manure and cover crops (T4) achieves the best results because of a synergic effect. T3 and T4 showed a decrease in bulk density and penetration resistance, with higher aggregate stability and water and air fluxes; in addition, T4 favored a significant higher yield in one season and a sustained biomass growth over time.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el efecto de una rotación de cultivos y el sinergismo de ésta con el estiércol sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de plantas de vid (*Vitis vinifera*). La investigación se realizó en Vallenar, Región de Atacama, entre los años 2006 y 2010. En un suelo de la Serie Cavanca (Xerollic Haplargid), se establecieron 4 tratamientos en parcelas que incluyeron 8 plantas de vid distribuidas en dos hileras: T1, testigo, suelo desnudo; T2, rotación de cultivos (raps-haba-mostaza-avena); T3, aplicación de estiércol de cabra (12,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹); T4, rotación de cultivos (raps-haba-cebada-mostaza) establecidos sobre estiércol (misma dosis de T3), con aplicaciones del estiércol en la sobrehilera y siembra de cultivos en toda la superficie. Las propiedades físicas del suelo se evaluaron a tres profundidades (0-10; 10-30 y 30-50 cm) en tanto en la vid se evaluó masa de poda, rendimiento y biomasa de raíces. Las aplicaciones de estiércol (T3 y T4) generaron un incremento de la materia orgánica del suelo, lo que resultó en una mejora de las propiedades físicas; sin embargo, el tratamiento que conjugó aplicación de estiércol y cultivo de cobertura (T4) fue el que logró los mejores resultados por un efecto sinérgico entre ambas estrategias. Así, T3 y T4 presentaron disminuciones en la densidad aparente y la resistencia a la penetración, con una mayor estabilidad de agregados y capacidad de flujo de agua y aire; además, T4 aumentó el rendimiento en una de las temporadas y mostró un crecimiento sostenido en el tiempo de la biomasa de la vid.

Palabras clave: Estiércol, cultivo de cobertura, propiedades físicas de suelo, estabilidad de agregados, *Vitis vinifera*.

INTRODUCCIÓN

La estructura es uno de los factores fundamentales del funcionamiento del suelo; según Hartge y Horn (2016), la capacidad de un suelo para transportar agua y gases está determinada por el tamaño y la distribución de los poros, la continuidad de éstos y su contenido de agua. La porosidad depende de la agregación del suelo, jugando un rol trascendental en el flujo de aire y agua, por lo que una alteración de la estructura producto del uso intensivo e inapropiado del suelo, implica también un cambio de los poros presentes en él (Dörner et al., 2011). Un factor fundamental para tener una buena estructura es la presencia de materia orgánica (MO), puesto que esta aumenta la estabilidad y funcionalidad del sistema poroso (Blanco-Canqui y Benjamin, 2013).

El efecto de la MO sobre las propiedades físicas del suelo se resume en una mayor disponibilidad de agua en una proporción dependiente de la textura del suelo (Rawls et al., 2003), una mayor estabilidad estructural (Oades, 1993) que favorece la persistencia de un sistema poroso estable y funcional en el transporte de agua y gases (Horn, 2003) y una mayor resistencia mecánica en condiciones de alta humedad (Zhang et al., 2005). Es por esto que el uso de MO resulta vital como práctica de manejo para mantener la calidad del suelo en sistemas de cultivos permanentes (Blanco-Canqui y Benjamin, 2013).

En el Valle de Huasco, Región de Atacama, las condiciones climáticas se presentan muy favorables para el cultivo de la vid (Lobato y Valenzuela, 2000). Sin embargo, las características edáficas, especialmente en lo referente al bajo contenido de materia orgánica (CIREN, 2007), inciden en que el potencial productivo se vea mermado, sobre todo por el deterioro físico del suelo producto del manejo agrícola (Seguel et al., 2013). Para subsanar los problemas de suelo en la región, se realizan distintos manejos, entre los que destacan el subsolado en pre-plantación y el establecimiento de las plantas de vid sobre platabandas, con el objeto de aumentar el volumen de exploración radical y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Sellés et al., 2012). Sin embargo, el tránsito de maquinaria y el pisoteo de la platabanda en condiciones inapropiadas de humedad, dan como resultado un deterioro de la estructura que se va acumulando con el tiempo, por lo que se recurre al uso de enmiendas orgánicas, principalmente estiércol de cabra (Baginsky et al., 2011). Si bien esta práctica contribuye a solucionar problemas de naturaleza física en suelos demasiado laboreados, es necesario señalar que el estiércol es comúnmente depositado en superficie, y muchas veces genera un aporte de sales que resulta negativo para el cultivo de la vid al disminuir el potencial osmótico del agua del suelo (Seguel et al., 2013).

Como alternativa al uso de estiércol, se propone el uso de cultivos anuales, cuyo desarrollo radical generaría cambios en el perfil del suelo, aumentando tanto la porosidad como la estabilidad de sus agregados (Blanco-Canqui et al., 2015). En trabajos previos en la Región de Atacama se establecieron rotaciones de cultivos en suelos pedregosos de matriz gruesa (Seguel et al., 2011) sin resultados en el corto plazo; también se contrastó el efecto de los cultivos versus el uso de estiércol en suelos de clase textural fina (Seguel et al., 2013), con resultados positivos cuando predominan las gramíneas en la rotación; sin embargo, no se ha probado la acción conjunta de los cultivos con el estiércol, esperándose un efecto sinérgico en comparación al uso de estiércol o de cultivos en forma independiente.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto acumulado que produce la rotación de cultivos y el sinergismo de estos con el estiércol sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con el crecimiento y desarrollo de las plantas de vid.

MATERIALES Y MÉTODO

Sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo entre los años 2006 al 2010, en un predio agrícola localizado a 7 km al oriente de la ciudad de Vallenar (28° 37' 02" Latitud Sur - 70° 42' 15" Longitud Oeste) en la Región de Atacama. Los análisis físicos se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El suelo pertenece a una Fase no calcárea de la Serie Cavanha (Xerollic Haplargids), la cual según CIREN (2007) se caracteriza por ocupar una posición de terraza remanente, con topografía plana, suavemente inclinada. De clase textural superficial franca y color pardo en superficie, en profundidad alcanza una clase textural franco arcillosa a franco arcillo limosa, con color pardo rojizo a rojo amarillento. A partir de un análisis químico inicial, se determinó que el suelo es no sódico, pero con una ligera salinidad en superficie, con valores de conductividad eléctrica (CE) de 3,7 dS m⁻¹. El clima está caracterizado por temperaturas máximas promedio en enero de 26,5 °C y mínima promedio en julio de 5,7 °C, sin presencia de heladas. La zona presenta una evaporación anual de 1.743 mm (Osorio et al., 1995) y una precipitación de 25 mm (CNR, 2008). El sitio del ensayo presentó un cultivo de *Vitis vinifera* cv. Red Globe de 8 años de edad, en un marco de plantación de 3,5 m x 3,5 m.

Se establecieron, entre los años 2006 y 2009, tratamientos con siembra de cultivos anuales y/o aplicaciones de estiércol de cabra, con el objeto de evaluar el efecto acumulativo de estos manejos sobre las propiedades físicas del suelo. El estiércol utilizado tuvo concentraciones muy altas de nutrientes, además de

una alta salinidad, con CE de 15,3 dS m⁻¹, por lo que se seleccionaron especies que presentaran algún nivel de tolerancia a la salinidad.

Tratamientos y diseño experimental

Se generaron cuatro tratamientos: T1, testigo; T2, siembra de cultivos sobre y entre la hilera de plantación de vid; T3, aplicación de una enmienda orgánica (estiércol de cabra fresco) sobre la hilera de plantación y; T4, aplicación de estiércol en la sobre hilera de plantación de vid y siembra de cultivos en la sobre y entre hilera. Se realizó un control de malezas manual durante todo el periodo del ensayo. En general los productores de vid de Vallenar mantienen la superficie del suelo desnudo (sin malezas) y cuando realizan aplicaciones de enmiendas orgánicas (una vez cada cuatro años) es normal el uso de estiércol de cabra. Los cultivos fueron establecidos en distintos sistemas de rotación a partir del año 2006, los cuales son detallados en el Cuadro 1.

El diseño experimental consistió en bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Como unidad experimental se consideró una parcela de 14 m de largo por 7 m de ancho, la cual incluyó 8 plantas de vid distribuidas en dos hileras de cuatro plantas. El muestreo de suelo se realizó entre las dos plantas centrales de una de las hileras de la unidad experimental.

El T1 correspondió al tratamiento testigo, en el cual el suelo se dejó sin sembrar y sin aplicar estiércol en las cuatro temporadas, manteniéndolo desnudo y libre de malezas, práctica habitual entre los productores de uva. En los tratamientos con cultivos (T2 y T4), la siembra se realizó a mano, inmediatamente después de la cosecha de la uva (entre los meses de marzo y abril, según temporada), abarcando toda la unidad experimental (entre hilera y sobre hilera). La semilla fue depositada sobre surcos de 5 cm de profundidad, previo riego inicial de 8 horas con el fin de dar las condiciones óptimas de humedad a la semilla y así favorecer el proceso de germinación. Los cultivos fueron sembrados a chorro continuo, excepto el haba, la cual se sembró a 12

cm en sobrehilera; en todos los casos se establecieron hileras distanciadas a 20 cm. Cuando se utilizó haba, esta fue previamente inoculada con bacterias fijadoras de nitrógeno (*Rhizobium leguminosarum* bv. viciae). Las dosis de siembra fueron equivalentes a: haba, 80 kg ha⁻¹; raps y mostaza, 44 kg ha⁻¹; avena y cebada, 142 kg ha⁻¹. El tratamiento T3 correspondió a estiércol de cabra fresco establecido en la sobre hilera sobre una batea de dimensiones de 2 m de largo, 0,5 m de ancho y 0,25 m de profundidad, en dosis de 12,5 Mg ha⁻¹. El T4 correspondió al mismo tratamiento con estiércol, pero sobre él se estableció el respectivo cultivo, el cual abarcó también la entre hilera, según detalle previo.

Las evaluaciones de suelo se centraron en la sobre hilera para evaluar el efecto sobre la zona de mayor enraizamiento de la vid. Cabe destacar que cada año fue incorporada la misma dosis de estiércol y los cultivos establecidos fueron previamente definidos en función de un sistema rotacional de acuerdo a Baginsky *et al.* (2011), buscando un complemento en los beneficios de los cultivos de cobertura y alternancia de sus sistemas radiculares. En este sentido, la rotación de T2 y T4 no son totalmente coincidentes, pues lo que se busca en el ensayo es ver el efecto acumulado de los manejos. La opción de usar cultivos anuales se basa en evitar periodos de competencia con el cultivo principal de la vid, motivo por el cual se descartan especies de hábito persistente.

En cuanto a la fertilización, esta se realizó en función de las necesidades de la vid, evitando con ello alterar el manejo habitual realizado por los productores (100 kg N ha⁻¹, 35 kg P₂O₅ ha⁻¹, 120 kg K₂O ha⁻¹, 110 kg CaO ha⁻¹, 30 kg MgO ha⁻¹, con pequeñas variaciones entre temporadas); lo mismo ocurrió con el riego, realizándose este por goteo, con emisores de 4 L h⁻¹ distanciados a 0,8 m sobre la línea, totalizando aproximadamente 9.500 m³ temporada⁻¹. El periodo estipulado para el crecimiento y desarrollo de las diferentes especies anuales, abarcó desde culminada la cosecha de la uva hasta la aplicación de la cianamida hidrogenada en el parronal (marzo a julio, aproximadamente). En ese momento el cultivo se segó, picó y distribuyó sobre la superficie del

Cuadro 1. Tratamientos y rotaciones de cultivos en las unidades experimentales durante el periodo 2006-2009.

Table 1. Treatments and crop rotations in the experimental units during the 2006-2009 period.

Tratamiento	Año			
	2006	2007	2008	2009
T1	Control	Control	Control	Control
T2	Raps	Haba	Mostaza	Avena
T3	Estiércol	Estiércol	Estiércol	Estiércol
T4	Estiércol + Raps	Estiércol + Haba	Estiércol + Cebada	Estiércol + Mostaza

suelo. En cuanto a la poda de la vid, esta se realizó en junio de cada año, dejando los residuos en la superficie del suelo.

Propiedades de suelo

En octubre de 2009, se tomaron muestras de suelo inmediatamente bajo la proyección del gotero y entre las dos plantas centrales de la sobrehilera norte de cada unidad experimental. Se realizó un análisis de fertilidad con muestra compuesta a una profundidad de 0 a 20 cm, evaluando el N total y P y K disponibles, además del pH; en tanto, la MO se evaluó para cada una de las repeticiones mediante el método de combustión húmeda (Sadzawka *et al.*, 2004) y a profundidades de 0-20 y 20-40 cm. Para las propiedades físicas se colectaron muestras a tres profundidades (0-10, 10-30 y 30-50 cm) de acuerdo a los horizontes morfológicos del suelo.

Se midió la textura por el método del hidrómetro Bouyoucos y la densidad aparente por los métodos del cilindro y el terrón (Sandoval *et al.*, 2012) con cuyos resultados se calculó la porosidad exped, que consiste en la relación $[1 - (Da_{cilindro} / Da_{terrón}^{-1})]$ (Seguel y Horn, 2006) como un índice de poros interagregados.

Para caracterizar el sistema poroso se utilizaron cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura, en los cuales se extrajeron muestras inalteradas de suelo, las cuales fueron sometidas a 0,2; 3; 6; 30 y 100 kPa de tensión en cama de arena y olla de presión; para la retención de agua a 1.500 kPa se utilizaron muestras disturbadas en plato de presión; con esta información se obtuvo la distribución de tamaño de poros a partir de la curva característica de retención de agua (Hartge y Horn, 2009).

Se evaluó la estabilidad de macroagregados mediante la persistencia de estos en tamizajes seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009) de manera tal de evaluar la variación del diámetro al 70% de la fracción acumulada (VD 70) para las muestras de 0-10 y 10-30 cm y al 90% para muestras de 30-50 cm (VD 90). Con las fracciones acumuladas de cada tamizaje (seco y saturado) se calculó el VD considerando el 70% o 90% de la fracción acumulada en base a masa para cada tamizado (VD 70 o VD 90) según la fórmula:

$$VD_i = [(A-B)/A] \times 100 \quad (\text{ec. 1})$$

Donde A corresponde al diámetro de los agregados correspondientes al 70 ó 90% de la fracción acumulada para el tamizaje en seco y B es el diámetro de los agregados correspondientes al 70 ó 90% de la fracción acumulada para el tamizaje en saturado.

La estabilidad de microagregados fue evaluada mediante el cálculo de la razón de dispersión (RD) según el método descrito por Seguel *et al.* (2003). Para

esto, agregados de entre 1 y 2 mm se someten a una dispersión en agua destilada, mientras que una contra muestra es totalmente dispersada con un agente sódico y agitación mecánica. Para una suspensión de las muestras en probeta, se realiza una medición de densidad con el hidrómetro de Bouyoucos a los 40 segundos (tiempo de decantación de arenas), determinando la RD mediante:

$$RD = (A+L)_w / (A+L)_t \quad (\text{ec. 2})$$

Donde (A+L)_w corresponde al contenido de arcilla más limo de la dispersión en agua destilada y (A+L)_t es el contenido de arcilla más limo totales, producto de la dispersión con agua destilada, sodio y agitación mecánica. Los parámetros VD70, VD90 y RD corresponden a índices de dispersión, por lo que a menor valor, mayor la estabilidad de los agregados.

Para evaluar el grado de resistencia mecánica, en campo se utilizó un penetrómetro de punta cónica (Koolen y Kuipers, 1983), el cual fue insertado horizontalmente en la cara de la calicata, tomando 10 mediciones por unidad experimental y profundidad (0-10; 10-30 y 30-50 cm) un día después del riego.

Con el objeto de determinar la funcionalidad del sistema poroso, se midió el flujo de aire por convección (Peth, 2004) a través de muestras de suelo inalteradas en cilindros de 6 cm de diámetro y 5 cm de altura, equilibradas a -33 kPa en olla de presión. Esta evaluación se realizó a las muestras de 10-30 y 30-50 cm de profundidad debido a que las muestras superficiales (0-10 cm) sufrieron alteraciones por acción de lombrices, lo que generó resultados poco confiables. Se midió también en terreno la velocidad de infiltración con cilindro infiltrómetro (Reynold *et al.*, 2002) para lo cual, entre las dos plantas centrales de cada tratamiento, se realizaron mediciones de altura de agua infiltrada a intervalos de tiempo regulares, de manera de construir las curvas de infiltración acumulada; con la pendiente estabilizada se estimó la velocidad de infiltración de agua en el suelo.

Evaluaciones en plantas

Para ver el efecto de los manejos sobre el desarrollo de la vid, se evaluó la producción de uva comercial (kg planta⁻¹), el peso de poda (kg planta⁻¹) y la materia seca de raíces (g L⁻¹). Para la obtención de las raíces se realizó un muestreo de suelo utilizando un barreno de tarro de 6,6 cm de diámetro y 17 cm de altura. Las muestras fueron tomadas en septiembre de 2009 a profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, clasificándolas en tamaños menores a 2 mm como raíces finas y mayores a 2 mm como raíces gruesas; después de esto fueron llevadas a estufa a 65 °C hasta peso constante. Finalmente, las raíces fueron pesadas y su valor fue expresado

sado en gramos de materia seca por litro de suelo. Se consideraron las dos plantas centrales de vid de la hilería norte de cada unidad experimental para las distintas mediciones de la vid.

Análisis estadístico

Con el objeto de comparar las variables entre tratamientos a una misma profundidad, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confianza del 95%, previa verificación de los supuestos respecto a los términos del error. Se utilizó el test de Anderson-Darling para verificar normalidad y el test de Bartlett para la homogeneidad de varianza. Cuando se determinaron diferencias significativas, se realizó el test de rango múltiple LSD ($p < 0,05$). Adicionalmente, se realizaron correlaciones lineales entre propiedades de suelo, lo que incluyó modelos de regresión lineal entre la infiltración acumulada y el tiempo para cada tratamiento, con los que se compararon las pendientes mediante una prueba t de Student ($p < 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades generales

El Cuadro 2 presenta los resultados de fertilidad realizados al final del ensayo (enero 2010), presentándose niveles altos de macronutrientes en todos los tratamientos, sin alteraciones importantes del pH.

Se observó una marcada diferencia de T3 y T4 con respecto a los otros tratamientos, ya que en estos se aplicó estiércol de cabra; además, el T4 fue sembrado con distintos cultivos, los que pudieron aportar con el reciclaje de nutrientes, ya que su reincorporación en superficie vía rastrojo aporta altos niveles de macronutrientes (Abiven *et al.*, 2009).

Para la textura del suelo (datos no mostrados), se encontró una dominancia de la fracción arena, con valores superiores al 50%, aunque entre 10-30 cm aumenta el contenido de arcilla. Las clases texturales se

Cuadro 2. Análisis químico de macronutrientes y pH al final del ensayo (enero 2010).

Table 2. Chemical analysis of macronutrients and pH at the end of the trial (January 2010).

Tratamiento	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (cmol kg ⁻¹)	pH
T1	0,22	58	1,83	7,4
T2	0,20	79	1,47	7,5
T3	0,43	314	5,26	7,4
T4	0,85	672	8,54	7,6

encontraron en el límite del franco arenoso con el franco arcillo arenoso, con niveles de arcilla (15-25%) que hacen que el suelo sea susceptible a la compactación (Horn, 2003). En cuanto al contenido de materia orgánica (MO, Cuadro 3), se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una profundidad de 0-20 cm, donde la aplicación de estiércol y/o estiércol más cultivo (T3 y T4) generaron valores más altos de MO en relación a T1 y T2.

Esta tendencia se mantuvo en profundidad, aunque sin diferencias estadísticas significativas. La aplicación directa de dosis anuales de estiércol en los tratamientos T3 y T4 favorecieron la acumulación de MO en superficie, alcanzando niveles mayores en relación al resto de los tratamientos, tal como lo describió Seguel *et al.* (2013), quienes en un suelo con 27% de arcilla y dosis anuales de estiércol de 15 Mg ha⁻¹ observaron un incremento del contenido de materia orgánica de un 2,8% a un 6,2% en un periodo de tres años.

Propiedades físicas del suelo

Densidad aparente

La densidad aparente (Da) por el método del cilindro presentó una respuesta a la aplicación de estiércol, destacando T3 y T4 con los menores valores hasta los 30 cm de profundidad (Cuadro 4), aunque T3 no presentó diferencias con T1 y T2 en ninguna de las profundidades evaluadas. La Da obtenida por terrón fue homogénea en profundidad, mostrando diferencias entre los tratamientos sólo en superficie. En este último caso destaca T4 como el mejor tratamiento, en el que la aplicación de estiércol se complementa con el establecimiento de un cultivo.

La disminución de la Da por efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en altas dosis ha sido previa-

Cuadro 3. Contenido de materia orgánica (Promedio \pm DE) de los tratamientos.

Table 3. Organic matter content (Average \pm SD) of the treatments.

Tratamiento	MO (%)	
	0 - 20 cm	20 - 40 cm
T1	3,64 (\pm 0,63) b	2,05 (\pm 0,52) a
T2	3,65 (\pm 0,94) b	2,59 (\pm 1,20) a
T3	10,06 (\pm 3,85) a	2,96 (\pm 1,19) a
T4	10,04 (\pm 4,24) a	3,38 (\pm 1,13) a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para una misma profundidad (misma columna) según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ($\alpha \leq 0,05$).

Cuadro 4. Densidad aparente (Mg m^{-3}) y porosidad exped ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para cada tratamiento a distintas profundidades. Promedio (\pm DE).

Table 4. Bulk density (Mg m^{-3}) and exped porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) for each treatment at different depths. Average (\pm SD).

Propiedad	Tratamiento	Profundidad (cm)		
		0-10	10-30	30-50
Da cilindro (Mg m^{-3})	T1	1,54 (\pm 0,16) b	1,62 (\pm 0,07) b	1,73 (\pm 0,08) a
	T2	1,53 (\pm 0,12) b	1,63 (\pm 0,05) b	1,72 (\pm 0,12) a
	T3	1,24 (\pm 0,23) ab	1,41 (\pm 0,20) ab	1,70 (\pm 0,10) a
	T4	0,93 (\pm 0,22) a	1,29 (\pm 0,15) a	1,68 (\pm 0,26) a
Da terrón (Mg m^{-3})	T1	1,77 (\pm 0,06) a	1,84 (\pm 0,07) a	1,87 (\pm 0,08) a
	T2	1,79 (\pm 0,10) a	1,80 (\pm 0,05) a	1,87 (\pm 0,08) a
	T3	1,59 (\pm 0,05) b	1,79 (\pm 0,10) a	1,90 (\pm 0,03) a
	T4	1,39 (\pm 0,09) c	1,72 (\pm 0,16) a	1,92 (\pm 0,13) a
P exped ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	T1	0,13 (\pm 0,06) a	0,12 (\pm 0,02) ab	0,07 (\pm 0,04) a
	T2	0,14 (\pm 0,10) a	0,09 (\pm 0,05) b	0,08 (\pm 0,07) a
	T3	0,22 (\pm 0,16) a	0,21 (\pm 0,12) ab	0,10 (\pm 0,06) a
	T4	0,33 (\pm 0,14) a	0,25 (\pm 0,07) a	0,14 (\pm 0,12) a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para una misma profundidad (misma columna) según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ($\alpha \leq 0,05$).

mente documentada (Seguel *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2014), alcanzando en este caso niveles no limitantes en superficie, aunque bajo los 30 cm todos los tratamientos presentaron niveles de limitación extrema (Ghaemi *et al.*, 2014), lo que indica que el cultivo no tuvo un efecto en profundidad con su sistema radical, requiriéndose un mayor tiempo de acción para generar una soltura mecánica (Trükmann *et al.*, 2006), o bien el apoyo de una labranza vertical (subsulado) para favorecer la exploración en profundidad (Guan *et al.*, 2015).

La porosidad exped presentó diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento con cultivo (T2) y el cultivo con adicción de estiércol (T4) entre los 10 y 30 cm de profundidad; el cultivo de cobertura no fue efectivo, en el corto plazo, en generar agregados más densos por secado de raíces, lo que ya había sido observado por Seguel *et al.* (2011) en un suelo de clase textural gruesa; sin embargo, la actividad de raíces se potenció cuando se recurrió a aplicaciones de estiércol.

Distribución de tamaño de poros

A partir de la curva de retención de agua se clasificaron los poros según tamaño, obteniéndose diferencias estadísticas significativas para el rango de los poros de drenaje rápido en superficie (PDR > 50 μm , Cuadro 5).

La aireación y el flujo de agua en el suelo dependen del tamaño de los poros y son un factor crítico para el

Cuadro 5. Poros de drenaje rápido (PDR, > 50 mm, %) para los tratamientos en función de la profundidad. Promedio (\pm DE).

Table 5. Fast drainage pores (PDR, > 50 μm , %) for treatments as a function of depth. Average (\pm SD).

Tratamiento	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-50
T1	16,1 (\pm 2,5) a	9,0 (\pm 2,6) a	7,2 (\pm 1,0) a
T2	19,8 (\pm 7,5) a	8,6 (\pm 2,5) a	9,0 (\pm 5,2) a
T3	28,3 (\pm 2,6) b	10,4 (\pm 6,5) a	11,0 (\pm 6,5) a
T4	29,2 (\pm 3,7) b	11,5 (\pm 2,1) a	10,4 (\pm 7,8) a

¹ Retención de agua a tensiones entre -2 y -60 hPa. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ($\alpha \leq 0,05$).

desarrollo de las raíces; cuando se habla de PDR, la literatura indica un rango de entre 12 y 15% como un valor referencial para el óptimo desarrollo de los cultivos (Sellés *et al.*, 2012). En superficie (0-10 cm) se presentó un alto porcentaje de PDR para todos los tratamientos; en el caso del testigo, podría deberse a la formación de la platabanda, que genera una condición mullida, pero en profundidad se presenta una discontinuidad, siendo

crítica en T1 (Horn y Fleige, 2009). En los tratamientos T3 y T4 el estiércol fue depositado en superficie, lo que genera las diferencias estadísticas con T1 y T2, pero este efecto desaparece por debajo de los 10 cm de profundidad. Si bien existen cultivos que presentan sistemas de raíces pivotantes, permitiendo una mayor exploración en profundidad que generan poros gruesos cuando se descomponen (Trükmann *et al.*, 2006), el T4 no fue capaz de generar este efecto, a diferencia de lo ocurrido con los espacios entre los agregados (Cuadro 4).

En los poros de drenaje lento (PDL, 10-50 μm) no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, presentándose en el rango del 2 al 4%, aunque existe una tendencia a una mayor proporción de ellos en los tratamientos donde hubo rotación de cultivos en todas las profundidades; con respecto a los poros de agua útil (0,2-10 μm , diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente) estos variaron entre 13 y 21%, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, dada la alta variabilidad de los resultados (datos no mostrados).

Estabilidad de agregados

La Figura 1 muestra los resultados de la dispersión de macro (VDA) y micro (RD) agregados por acción del agua, por lo que el menor valor denota la mayor estabilidad.

En general todos los tratamientos manifestaron una mayor estabilidad en superficie (0-10 cm), la que disminuyó en profundidad, alcanzando valores de dispersión cercanos al 60% en cada prueba. La mayor dispersión en profundidad responde a la menor disponibilidad de materia orgánica y a la menor intensidad en los ciclos de secado y humectación en relación al

horizonte superficial (Brunel-Saldías *et al.*, 2016). Entre los 30 a 50 cm, la baja estabilidad de los agregados (alta dispersión) está dada por la condición del suelo, que tiene una estructura débil por la poca evolución pedológica y la menor actividad biológica (Seguel *et al.*, 2015). En el testigo, la estabilidad en superficie se debe a la intensidad de los ciclos de secado y humedecimiento (Falsone *et al.*, 2017), ya que el suelo se encuentra descubierto y sometido a eventos de riego, permitiendo la evaporación del agua con contracción de las partículas; sin embargo, es la menor estabilidad entre todos los tratamientos y se mantiene casi sin variaciones en profundidad.

En T2 se observó una estabilidad homogénea hasta los 30 cm, debido a que la mayoría de los cultivos seleccionados en la rotación tienen una raíz pivotante profundizadora (Faigenbaum, 2003). En T3 y T4 se observó la mayor estabilidad de agregados en superficie comparado con los demás tratamientos, producto de la aplicación de estiércol (Seguel *et al.*, 2003), destacando la VD de T4, con la mejor estabilidad en todo el perfil, ya que junto con la enmienda se incluyó la rotación de cultivos, lo que destaca el efecto activo de las raíces sobre la estabilidad del suelo al promover el secado de los agregados (Pagenkemper *et al.*, 2014). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en profundidad para ninguno de los casos, en parte por la alta variabilidad de los resultados, demostrando que el efecto de los tratamientos es mayoritariamente de carácter superficial.

Para el caso de los microagregados, los tratamientos T3 y T4 presentaron valores de RD bajos en superficie, los cuales pueden ser clasificados según Seguel *et al.* (2003) como estables, observándose una mejora en las propiedades físicas del suelo con respecto al resto

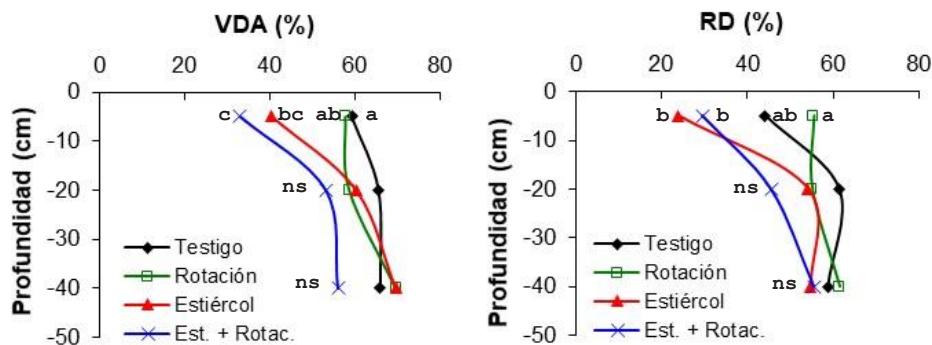


Figura 1. Dispersión (%) de macro (VDA) y micro (RD) agregados en cada tratamiento y profundidad. Valores menores denotan mayor estabilidad. Letras distintas implican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad ($\alpha \leq 0,05$) según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher. ns: sin diferencias estadísticas significativas.

Figure 1. Dispersion (%) of macro (VDA) and micro (RD) aggregates in each treatment and depth. Lower values denote greater stability. Different letters imply statistically significant differences between treatments at the same depth ($\alpha \leq 0.05$) according to Fisher's LSD multiple comparisons test. ns: no statistically significant differences.

de los tratamientos, que son clasificados como inestables ($RD > 30\%$). Los resultados responden a la incorporación de MO fresca en altas dosis en los tratamientos T3 y T4, que genera una activación microbiológica con aporte de polisacáridos, favoreciendo la unión de partículas minerales (Heitkötter *et al.*, 2017). En profundidad no se presentaron diferencias estadísticas significativas, pero entre 10-30 cm se comienza a ver el efecto de la acción conjunta de los cultivos con estiércol (T4), manifestando una menor dispersión en relación al resto de los tratamientos.

La degradación y posterior destrucción de los agregados del suelo por efecto del agua, se debe al hinchamiento por hidratación y a la energía cinética del impacto de las gotas de lluvia; la materia orgánica tiene un efecto agregante, debido a que forma una estructura reticular alrededor de los componentes inorgánicos, además de fortalecer las uniones que aseguran una mejor estabilidad de los agregados en el tiempo, dada la naturaleza electroestática de los grupos funcionales (Oades, 1993; Pagenkemper *et al.*, 2014). Chenu y Plante (2006) señalan que la materia orgánica promueve una mayor cohesión interna de los agregados e incrementa la hidrofobia de estos; permite, por tanto, mejorar la estabilidad de los agregados al agua por un aumento de la resistencia a la presión del aire debido a una menor velocidad de humectación (Ellies *et al.*, 2005).

Resistencia a la penetración

La Figura 2 presenta los valores de resistencia a la penetración horizontal, para cada uno de los tratamientos en profundidad, evaluados a capacidad de campo. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en superficie (0-10 cm), pudiendo observarse en el testigo una alta resistencia, dado el estado de sobre-consolidación por pisoteo durante la temporada, mientras que el resto de los tratamientos presentó una menor resistencia producto del manejo orgánico, sin diferencias estadísticas entre ellos. La resistencia a la penetración varía desde fuerte a muy fuerte, limitando el crecimiento radical de los cultivos y de la vid, aunque no sobrepasa el valor crítico de 80 N (NSSC, 2002) sobre el cual las raíces presentan dificultades para elongarse.

Algunos factores que influyen en la resistencia a la penetración son el contenido de agua, la densidad aparente, el contenido de MO, la estructura de suelo y el contenido de arena y arcilla, entre otros (Bengough *et al.*, 2011). En este caso, el factor diferenciante es el contenido de MO, que afecta a la Da y con ello a la resistencia mecánica. Diversos autores destacan el efecto de la MO al disminuir la resistencia a la penetración (Baginsky *et al.*, 2011; Sellés *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014), lo que se relaciona, para un mismo suelo, con una mejor estructura. Esto es debido a que la MO confiere propiedades elásticas al suelo, lo que permite recuperarse de

cargas aplicadas en superficie, como lo son el tráfico de maquinaria y humano (Zhang *et al.*, 2005).

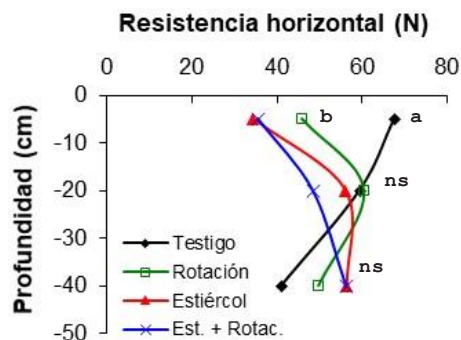


Figura 2. Resistencia a la penetración horizontal (N) a distintas profundidades para cada tratamiento. Letras distintas implican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad ($\alpha \leq 0,05$) según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher. ns: sin diferencias estadísticas significativas.

Figure 2. Resistance to horizontal penetration (N) at different depths for each treatment. Different letters imply statistically significant differences between treatments at the same depth ($\alpha \leq 0.05$) according to Fisher's LSD multiple comparisons test. ns: no statistically significant differences.

Propiedades dinámicas del suelo

Flujo de Aire

Aunque en el flujo de aire no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 6), T3 y T4 tendieron a presentar mayores valores en las dos profundidades analizadas. En el caso del tratamiento T2 se observó un ligero aumento del flujo aire en profundidad, ya que la rotación de cultivos incluyó especies con distintos sistemas radicales que exploran de mejor forma el suelo, generando una porosidad más continua y funcional en el tiempo (Pagenkemper *et al.*, 2014).

Los resultados son acordes con los obtenidos por Seguel *et al.* (2011) y Seguel *et al.* (2013), quienes trabajaron en un suelo de textura gruesa y presencia de gravas y en otro que presentaba problemas de compactación, respectivamente. Para el presente estudio, la aplicación de estiércol mejoró la condición física del suelo, logrando un mayor flujo de aire, pero se observaron mejores resultados cuando se sembró cultivo sobre el estiércol. Este hecho estaría relacionado con la descomposición de las raíces de las diferentes especies que conformaron la rotación, mejorando la persistencia y continuidad del sistema poroso en el tiempo (Zúñiga *et al.*, 2015). Como resultado, se favorece la capacidad de conducción de aire en el suelo, existiendo una correlación entre el flujo de aire y los poros gruesos (Figura 3).

Cuadro 6. Flujo de aire (cm h^{-1}) en los distintos tratamientos y profundidades. Muestras equilibradas a 33 kPa de tensión. Promedio (\pm DS).

Table 6. Air flow (cm h^{-1}) in the different treatments and depths. Samples balanced at 33 kPa water tension. Average (\pm SD).

Tratamiento	Flujo aire (cm h^{-1})	
	10-30 cm	30-50 cm
T1	31,8 (\pm 36,7)	30,5 (\pm 45,3)
T2	37,2 (\pm 35,8)	44,7 (\pm 44,9)
T3	62,5 (\pm 36,3)	48,8 (\pm 45,8)
T4	56,6 (\pm 58,7)	52,2 (\pm 78,7)

Sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ($\alpha > 0,05$).

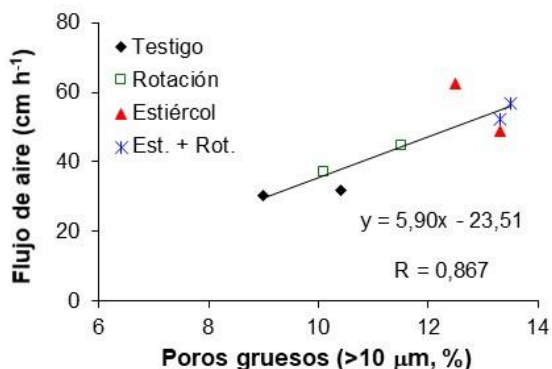


Figura 3. Correlación entre poros gruesos ($> 10 \mu\text{m}$, %) y flujo de aire (cm h^{-1}) para los horizontes subsuperficiales. * Significativo al 99%.

Figure 3. Correlation between coarse pores ($> 10 \mu\text{m}$, %) and air flow (cm h^{-1}) for subsurface horizons. * Significant at 99%.

La correlación fue significativa, lo cual refleja los tratamientos generan una continuidad porosa, permitiendo el flujo de aire a través del suelo (Pagliai y Vignozzi, 2002). Al respecto, si bien las rotaciones incluyeron crucíferas, las cuales poseen un patrón de enraizamiento profundo, dada su raíz pivotante (Lui *et al.*, 2011), éstas por sí solas no son capaces de generar una mayor capacidad de flujo de aire en el suelo, por lo que el manejo necesariamente se debe complementar con la aplicación de estiércol.

Velocidad de infiltración

Para la velocidad de infiltración (VI) se compararon las pendientes estabilizadas de la infiltración acumulada

en el tiempo mediante una prueba t ($\alpha \leq 0,05$), pudiendo observarse en el Cuadro 7 que la mayor VI se obtuvo con el tratamiento que mezcló la aplicación de estiércol con una rotación de cultivos (T4).

La velocidad de infiltración está relacionada con la textura dominante en el suelo y el contenido de MO, la cual promueve la formación de macroporos, mejorando así la infiltración de agua y la aireación del suelo; por ende, una mayor porosidad explica una mayor infiltración acumulada en los tratamientos orgánicos (Seguel *et al.*, 2003; Abiven *et al.*, 2009). Por este motivo, el tratamiento T4 posee la mayor VI en comparación a los otros tratamientos, puesto que tiene un mayor contenido de materia orgánica (Cuadro 3). Las mayores tasas de infiltración la presentaron los tratamientos T2, T3 y T4, ya que poseen una gran proporción de macroporos, como se aprecia en el Cuadro 5; además los tratamientos T3 y T4 presentaron una mayor estabilidad (Figura 2) debido a la depositación de MO en las paredes de los macroporos.

Según la clasificación de Casanova *et al.* (2008) los valores obtenidos para la VI son considerados como de clase rápida en T1, T2 y T3, y como muy rápida en T4, lo que implica una mejoría en la estructura respecto a la condición inicial del suelo.

Propiedades de la vid

La Figura 4a muestra el rendimiento de las plantas de vid en términos de la producción de uva comercial para tres temporadas (2007-2008, 2008-2009, 2009-2010), en tanto la Figura 4b presenta los respectivos pesos de poda.

Los rendimientos fueron variables durante las temporadas, esto producto que la vid está influenciada por distintos factores, tales como el suelo, las condiciones climáticas y el manejo. La rotación de cultivos en los tratamientos no fue limitante para el desarrollo normal de la vid, ya que no afectó el rendimiento en relación al

Cuadro 7. Comparación de pendientes estabilizadas de la velocidad de infiltración (VI) de los tratamientos.

Table 7. Comparison of stabilized slopes of the infiltration rate (VI) of the treatments.

Tratamiento	VI estabilizada (cm h^{-1})
T1	14,6 c
T2	24,5 ab
T3	24,0 b
T4	32,8 a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre las pendientes de los tratamientos ($\alpha \leq 0,05$).

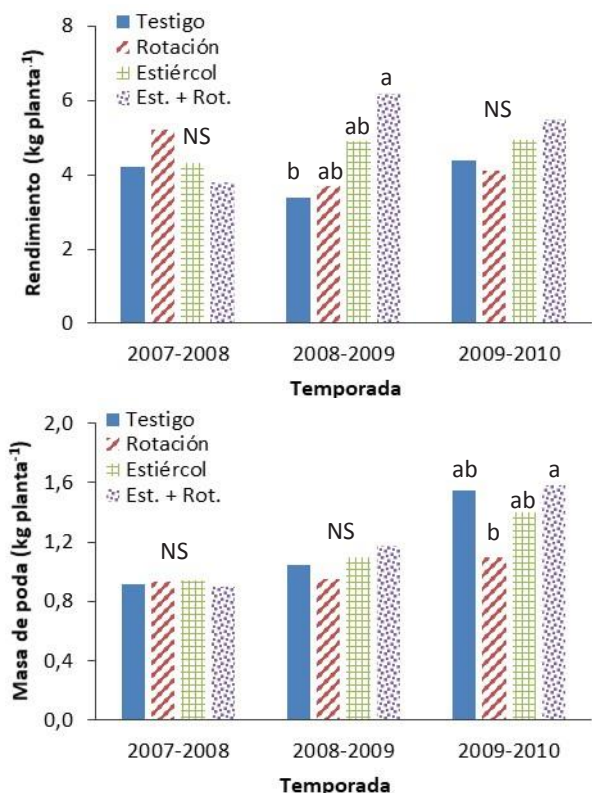


Figura 4. Producción de uva comercial (kg planta⁻¹) y masa de poda (kg planta⁻¹) en tres temporadas de producción. Letras diferentes implican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos dentro de una misma temporada según la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ($\alpha \leq 0,05$). NS: sin diferencias significativas entre tratamientos.

Figure 4. Commercial grape production (kg plant⁻¹) and pruning weight (kg plant⁻¹) during three seasons. Different letters imply statistically significant differences between treatments within the same season) according to Fisher's LSD multiple comparison test ($\alpha \leq 0,05$). NS: no significant differences between treatments.

testigo, por lo que se puede concluir que la siembra de los cultivos en el periodo de receso de la vid no generó competencia por los recursos agua y nutrientes. También se observó que los tratamientos donde se aplicaron enmiendas orgánicas como el estiércol, al cabo del tiempo aumentaron los rendimientos, aunque no siempre generaron diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo. Pan *et al.* (2009) plantean que el incremento de la MO del suelo disminuye la variabilidad interanual producto de accidentes climáticos, lo que no se observó con claridad en los resultados de este estudio.

La biomasa de poda depende del manejo específico que se realiza al parrón, pudiendo variar año a año; además, los tratamientos con estiércol generan un aporte extra de macronutrientes una vez que ocurre el

proceso de mineralización, pudiendo afectar el crecimiento vegetativo. En este estudio, salvo el T2 con cultivo de cobertura, los tratamientos tuvieron un incremento sostenido de la biomasa vegetativa, llegando a la tercera temporada de evaluación a generar diferencias estadísticas significativas entre T4 y T2. Sin embargo, el peso de poda no se correlacionó con el rendimiento de uva, por lo que las diferencias se deberían a un equilibrio funcional de la planta de vid más que a competencia entre éstas con los cultivos.

Finalmente se evaluaron las raíces de la vid en dos rangos de profundidad, resultados que se presentan en la Figura 5.

La distribución de raíces es similar en los distintos tratamientos, con lo que se puede concluir que no se produjo una alteración negativa en las plantas de vid al implementar las rotaciones de cultivos. Se aprecia que en T4 hay un aumento de las raíces finas en superficie en comparación con los demás tratamientos, debido a las mejores condiciones físicas y posiblemente por el aumento de temperatura al descomponerse el estiércol, llegando a valores cercanos al óptimo de 30 °C para el máximo crecimiento (Callejas *et al.*, 2014). No se evidenció un efecto dañino por aporte salino del estiércol, ya que las altas tasas de riego favorecerían el lavado de sales, además del efecto de absorción por parte de la cobertura en el T4 (Seguel *et al.*, 2013).

En definitiva, los cultivos de cobertura no presentan un riesgo de competencia importante para la producción comercial de la vid; al contrario, generan beneficios directos a las propiedades físicas del suelo, asegurando la sustentabilidad de los sistemas productivos en el largo plazo, más aún si se complementan los

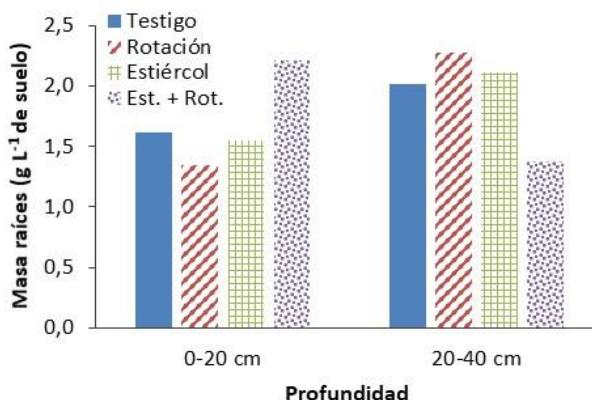


Figure 5. Materia seca de raíces finas (< 2 mm). No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($\alpha \leq 0,05$).

Figure 5. Dry matter of fine roots (< 2 mm). No statistically significant differences were found between treatments ($\alpha \leq 0,05$).

manejos, como se evidenció en el presente estudio al generar desarrollo de cultivos de cobertura sobre las aplicaciones habituales de estiércol.

CONCLUSIONES

Los manejos propuestos para un suelo bajo riego en un clima semiárido tuvieron efectos positivos sobre las propiedades estructurales de éste. El uso de enmiendas orgánicas y de cultivos de cobertura generan una mejora en las propiedades físicas del suelo, destacando la disminución de la densidad aparente y la resistencia mecánica, además del aumento de la porosidad gruesa, la estabilidad de agregados y la velocidad de infiltración de agua. Estos resultados se lograron con sólo un riego extra para el establecimiento de los cultivos de cobertura, aspecto crucial para la zona de estudio.

La aplicación de cultivos de cobertura en la sobre-hilera de plantación de vid no afecta el rendimiento de uva comercial. La aplicación conjunta de estiércol y siembra de cultivo generó un mayor rendimiento de uva comercial en una de las temporadas; sin embargo, es necesario continuar estos estudios, analizando el efecto del aporte de nutrientes propios del estiércol y los efectos sobre el reciclaje de nutrientes por parte de los cultivos de cobertura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al productor Pablo Álvarez por su apoyo en el desarrollo del ensayo. Este trabajo fue financiado por el proyecto INNOVA-Chile of CORFO (05 CR11IAT-06).

REFERENCIAS

- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 41(1), 1–12.
- Baginsky C., Seguel, O., Contreras, A., 2011. Impacto en la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo. Facultad de Ciencias Agronómicas, Serie Ciencias Agronómicas N° 17. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62(1), 59–68.
- Blanco-Canqui, H., Benjamin, J., 2013. Impacts of soil organic carbon on soil physical behavior. *Advances in Agricultural Systems Modelling*. Soil Science Society of America Journal 3, 11–40.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T., Lindquist, J., Shapiro, C., Elmore, R., Francis, C., Hergert, G., 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal* 107(6), 2449–2474.
- Brunel-Saldías, N., Martínez, I., Seguel, O., Ovalle, C., Acevedo, E., 2016. Structural characterization of a compacted alfalfa under different tillage systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(3), 689–701. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000050>.
- Callejas, R., Silva, A., Peppi, C., Seguel, O., 2014. Factibilidad agronómica del uso de vinaza, subproducto de la fabricación del pisco, como biofertilizante en viñedos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 8(2), 230–241.
- Casanova, M., Seguel O., Haberland J., Kremer, C., 2008. Propiedades físicas: Indicadores de calidad y salud de suelos. *Antumapu* 6 (1-2), 32–34.
- Chenu, C., Plante, A.F., 2006. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the ‘primary organomineral complex’. *European Journal of Soil Science* 57, 596–607.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2007. Estudio Agrológico del Valle del Copiapó y Valle del Huasco. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N° 135, Santiago, Chile.
- Comisión Nacional de Riego (CNR), 2008. ESIIR. Sistema de información integral de riego. Disponible en: <http://esiiir.cnr.cl/>.
- 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 & Tillage Research* 115-116, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.07.002>.
- Ellies, A., Ramírez, C., Mac Donald, R., 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena* 59, 69–78.
- Faiguembaum, H., 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Impresora y Editor Ograma, Santiago, Chile.
- Falsone, G., Stanchib, S., Bonifacio, E., 2017. Simulating the effects of wet and dry on aggregate dynamics in argillic fragipan horizon. *Geoderma* 305, 407–416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.026>.
- Ghaemi, M., Astaraei, A.R., Emami, H., Nassiri Mahalati, M., Sanaeinejad, S.H., 2014. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14 (4), 987–1004.
- Guan, D., Zhang, Y., Al-Kaisi, M.M., Wang, Q., Zhang, M., Li, Z., 2015. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. *Soil & Tillage Research* 146, 286–295.
- Hartge, K., Horn, R., 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany.
- Hartge, K., Horn, R., 2016. Essential Soil Physics: An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics, in: Horton, R., Horn, R., Bachmann, J., Peth, St. (Eds.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 391 p.
- Heitkötter, J., Heinze, S., Marschner, B., 2017. Relevance of substrate quality and nutrients for microbial C-turnover in top and subsoil of a Dystric Cambisol. *Geoderma* 302, 89–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.029>.
- Horn, R., 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116, 77–88.

- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research* 102, 201–208.
- Koolen, A., Kuipers, H., 1983. *Agricultural soil mechanics*. Advances Series in Agricultural Sciences 13. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Lobato, A., Valenzuela, J., 2000. Zona Central. INIA, Uva de mesa en Chile. Santiago, Chile.
- Lui, L., Gan, Y., Bueckert, R., Van Rees, A., 2011. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crops Research* 122 (3), 248–255.
- National Soil Survey Center (NSSC), 2002. *Field Book for describing and sampling soils*. version 2.0 Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.
- Oades, J.M., 1993. The role of the biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56, 377–400.
- Osorio, A., Tapia, F., Salinas, R., 1995. *Suelos y climas del valle del Huasco y sus alternativas de cultivo*. INIA-Intihuasi. Cartilla Divulgativa N°1, Santiago, Chile.
- Pagenkemper, S., Uteau, D., Peth, S., Horn, R., 2014. Investigation of time dependent development of soil structure and formation of macropore networks as affected by precrop species. *International Soil and Water Conservation Research* 2(2), 51–66.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality, in: Pagliai, M., Jones, R. (Eds.), *Sustainable land management-environmental protection. A soil physical approach*. Advances in Geoecology 35. IUSS. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany, pp. 71–82.
- Pan, G., Smith, P., Pan, W., 2009. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129, 344–348.
- Peth, S., 2004. *Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittleistung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wold- und subarktisch-alpinen*. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, H64, ISSN:0933-680x.
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M., Bloodworth, H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116, 61–76.
- Reynold, W., Elrick, D., Youngs, E., Amoozegar, A., Booltink, H.W., 2002. Saturated and field saturated water flow parameters, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis*. Parth 4. Physical methods. SSSA. Madison, Wisconsin, USA, pp. 797–878.
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M.L., 2004. *Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos*. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile.
- Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., Rivera, D., 2012. *Métodos de Análisis Físicos de Suelos*. Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. Publicación N° 5.
- Seguel, O., García de Cortázar, V., Casanova, M., 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3), 287–297.
- Seguel, O., Horn, R., 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting – drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 221–232.
- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J., González, C., Sandoval, M., 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 11(1), 1–15.
- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J.I., González, C., Poblete, L., 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(3), 690–705.
- Seguel, O., Farías, E., Luzio, W., Casanova, M., Pino, I., Parada, A. M., Videla, X., Nario, A., 2015. Physical properties of soil after change of use from native forest to vineyard. *Agro Sur* 43(2), 23–39.
- Sellés, G., Ferreyra-Espada, R., Ruiz, R., Ferreyra-Bustos, R., Ahumada, R., 2012. Compactación de suelos y su control: Estudio de casos en el Valle de Aconcagua. *Boletín INIA N° 234*, Santiago, Chile.
- Trükmann, K., Reintam, E., Kuht, J., Rääts, V., 2006. Growing of Mugwort (*Artemisia vulgaris* L.), Canadian Thistle (*Cirsium arvense* L.) and Yellow Lupine (*Lupinus luteus* L.) on compacted soil, in: Horn, R., Fleige, H., Peth, S., Peng, X. (Eds.), *Soil management for Sustainability*. Adv. in Geoecology 38. IUSS. Catena Verlag. Germany, pp. 362–369.
- Zhang, B., Horn, R., Hallett, P.D., 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 69(3), 864–871.
- Zhang, P., Wei, T., Jia, Z., Han, Q., Ren, X., 2014. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China. *Geoderma* 230-231, 41–49.
- 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 & Tillage Research* 145, 233–241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>