



Efecto del ácido húmico sobre las propiedades físicas de un Haplohumult cultivado con trigo

Effect of humic acid on the physical properties of a Haplohumult cultivated with wheat

Seguel, O.^a, Parra, C.^a, Homer, I.^a, Kremer, C.^a, Beyá-Marshall, V.^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.



ARTICLE INFO

Keywords:

Aggregate stability
Available water
Porosity
Yield
Triticum aestivum

Original Research Article,
Special Issue: Sustainable
Management of Volcanic Ash Soils

*Corresponding author:

Óscar Seguel
E-mail address:
oseguel@uchile.cl

ABSTRACT

Considering the fragility of Ultisols subjected to intensive agricultural use, the present study aimed to evaluate the effect of humic acid on some physical properties of an Andic Haplohumult cultivated with wheat in the Araucanía Region, south of Chile. The treatments were a control without amendment (T0), application of humic acid (T1), and native forest (T2) in which the soil has not been altered for more than twenty years. Samples were taken at two depths (0-10 and 30-40 cm) with four replications, evaluating some physical properties one month after the amendment application and six months thereafter. Also, yield components for wheat were measured. As for the soil physical properties, in the short term the application of humic acid had positive effects on water retention, there was an increase in porosity, a decrease in bulk density and improved stability of macroaggregates in depth (30-40 cm), reaching levels similar to native site. There was also a higher biomass production and a 24% increase in wheat yield in the treatment with application of the amendment with respect to the control without amendment. This result is explained by an increase in number of grains per square meter, without changing the weight of the grain, with a higher amount of grains per spikes due to better soil condition.

RESUMEN

Considerando la fragilidad de los Ultisoles sometido a uso agrícola intensivo, en el presente estudio se evaluó el efecto de un ácido húmico sobre algunas propiedades físicas de un suelo Andic Haplohumult cultivado con trigo en la Región de la Araucanía, sur de Chile. Los tratamientos aplicados fueron un control sin enmienda (T0), aplicación de ácido húmico (T1) y bosque nativo, sin intervención del suelo en un período de tiempo superior a los 20 años (T2). Se realizaron muestreos a dos profundidades (0-10 y 30-40 cm) con cuatro repeticiones, evaluando algunas propiedades físicas del suelo a un mes de la aplicación de la enmienda y a los 6 meses después de ésta. Además, se midieron los componentes de rendimiento del cultivo del trigo. En cuanto a las propiedades físicas de suelo, en el corto plazo la aplicación de ácido húmico tuvo efectos positivos sobre la retención de agua, se produjo un aumento en la porosidad, hubo una disminución de la densidad aparente y se originó mayor estabilidad de macroagregados en profundidad (30-40 cm), alcanzando niveles similares al sitio nativo. También existió una mayor producción de biomasa y un aumento de un 24% en el rendimiento de trigo en el tratamiento con aplicación de la enmienda respecto al control sin enmienda. Este resultado se explicó por un aumento en el número de granos por metro cuadrado, sin modificar el peso del grano, con mayor cantidad de granos por espiga producto de una mejor condición del suelo.

Palabras claves: Estabilidad de agregados, agua aprovechable, porosidad, rendimiento, *Triticum aestivum*.

INTRODUCCIÓN

Los suelos son sistemas complejos de enorme trascendencia, ya que soportan la vida, suministrando nutrientes y energía para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de los animales; los componentes orgánicos del suelo, si bien se encuentran en menor proporción

respecto a los componentes inorgánicos, juegan un rol fundamental en la estructuración y ordenamiento de las partículas sólidas (Blum *et al.*, 2018).

Respecto a su composición, los componentes orgánicos pueden dividirse en dos clases de material: el no-húmico (por ejemplo, proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y pequeñas moléculas de azúcar y

aminoácidos) y las sustancias húmicas (Stevenson, 1994). Las sustancias húmicas son cadenas carbonadas estables que tienen profundos efectos físicos, químicos y biológicos sobre el suelo, destacando aquellas que presentan relación con la producción de cultivos. Además, influyen en la movilidad de compuestos orgánicos no iónicos como pesticidas y contaminantes, removiéndolos de las soluciones acuosas, retienen los nutrientes por sus propiedades de intercambio catiónico y son fuente de N, P y S para las plantas (Havlin et al., 2013). De acuerdo a su solubilidad en el medio acuoso, estas sustancias pueden separarse en Ácidos Fúlvicos (soluble a todos los valores de pH), Huminas (insolubles a todos los valores de pH) y Ácidos Húmicos (solubles en medio alcalino e insolubles a pH menor a 2) (Jano, 2003).

Los ácidos húmicos comprenden un conjunto de moléculas orgánicas heterogéneas, reunidas en agregados orgánicos, estabilizadas por enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas (Piccolo, 2002). Los ácidos húmicos pueden promover el crecimiento y desarrollo vegetal de varios cultivos de interés agronómico (Rodda et al., 2006; Zandonadi et al., 2007; Baldotto et al., 2009). Estos efectos se reflejan en el aumento de la tasa de crecimiento de las raíces, incrementos en la biomasa vegetal y cambios en la arquitectura de la raíz (Canellas et al., 2006; Marqués et al., 2008; Baldotto et al., 2009). En el mercado existen productos a base de ácidos húmicos de distinto origen, destacando aquellos derivados de Leonardita por su alta reactividad y estabilidad en su composición (Imbufe et al., 2005).

A nivel de propiedades físicas de suelo, se ha estudiado el efecto del ácido húmico en diversos suelos, destacando el incremento en la retención del agua (Kolodziej et al., 2016), el aumento en la porosidad gruesa (Seguel y Marín, 2011) y la mayor estabilidad estructural (Imbufe et al., 2005). A nivel biológico, se ha visto un aumento en la mineralización de los rastros, con el beneficio asociado a las propiedades físicas del suelo (Vidal et al., 2002). Al respecto, la adición de residuos orgánicos al suelo, producto de la mejora en las propiedades físicas, previene la degradación por erosión hídrica o exceso de mecanización (Jordan et al., 2010; Seguel et al., 2013), lo que, de acuerdo con diversos autores (Seguel y Marín, 2011; Kolodziej et al., 2016; Moreno et al., 2017), es potenciado por la interacción de un ácido húmico con un residuo de cosecha.

Los estudios antes mencionados se han realizado en condiciones agroecológicas con precipitaciones menores a los 900 mm anuales y sobre suelos de mineralogía cristalina. En particular, resulta necesario estudiar si los beneficios asociados a este tipo de enmienda se replican en suelos de origen volcánico, que por sus características y condición climática se encuentran propensos a ser degradados bajo sistemas de

labranza convencional (Dörner et al., 2012). Al respecto, la Región de la Araucanía presenta niveles de precipitación mayores a 1.100 mm anuales y al menos un 28% de la superficie total de sus suelos tienen algún grado de erosión (CIREN, 2010), siendo habitualmente cultivados con gramíneas bajo sistemas de labranza convencional en circunstancias que, por su relieve y características, son propensos a degradarse (Luzio et al., 2010). Además, de acuerdo a ODEPA (2015), la Región cuenta con una superficie de 107.869 ha cultivadas con trigo, con un rendimiento promedio de 53,2 qm ha⁻¹ y en donde la agricultura se desarrolla principalmente en condiciones de secano, con sobre un 90% de la superficie cultivada con trigo bajo esta condición.

Lo suelos de la Región derivados de cenizas volcánicas y con altos contenidos de materia orgánica (>8%), presentan condiciones físicas óptimas para la producción agrícola (CIREN, 2002); sin embargo, se ha demostrado ampliamente que sufren procesos de compactación y pérdida de funcionalidad física por efecto del manejo intensivo, siendo la condición óptima la que presenta el suelo bajo bosque nativo (Seguel y Horn, 2006; Dörner et al., 2009a; Dec et al., 2017) como referente de la condición original del suelo previo a la transformación para uso agrícola. Por este motivo, en el presente trabajo se evaluó el cambio de algunas propiedades físicas de un suelo sometido a labranza tradicional, con y sin aplicación de sustancias húmicas, contrastándolo con la situación sin enmienda y con la condición bajo bosque nativo, analizando el efecto de estos cambios sobre el rendimiento de un cultivo de trigo, con miras a generar una herramienta práctica para la sustentabilidad agrícola de la Región.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El ensayo se realizó en el Huerto Hijuelas (38°59' Sur; 73°05' Oeste), Comuna de Teodoro Schmidt, Provincia de Cautín, Región de la Araucanía, entre julio del año 2014 y febrero del 2015, sobre un suelo que se cultivó con trigo en una superficie aproximada de 0,90 ha. Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El suelo en estudio es de origen volcánico y pertenece a la Serie Correltúe, desarrollado a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico, que se encuentra principalmente en la Cordillera de la Costa, a una altura de 250-300 m s. n. m. Miembro de la Familia fina, mixta, mélica de los Andic Haplohumults, esta Serie de suelo es de textura superficial franco limosa y color pardo oscuro en matices del 10 YR; de textura franco limosa y color rojo oscuro en matices 2.5 YR en profundidad (CIREN, 2002). El

suelo posee buena permeabilidad y drenaje, con una pendiente de entre un 5 a un 8%.

De acuerdo a la clasificación Köeppen, la zona está sometida a un clima oceánico, con 2 meses secos y cuyo régimen hídrico presenta precipitaciones anuales de 1.188 mm y evapotranspiración acumulada de 587 mm durante el período del cultivo. La temperatura media anual es de 16,9 °C, siendo enero el mes más cálido, con máximas promedio cercanas a los 21,8 °C, y julio el mes más frío, con mínimas promedio del orden de los 4,7 °C (Uribe *et al.*, 2012). Para el período de desarrollo del cultivo, la Figura 1 presenta los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración de referencia de acuerdo a los datos entregados por el INIA en su estación meteorológica C. Llolinco, ubicada en la Comuna de Teodoro Schmidt, destacando que en el mes de octubre del 2014 la evapotranspiración de referencia se iguala al aporte de las precipitaciones; posteriormente, a partir de noviembre la evapotranspiración supera con creces los aportes hídricos naturales, pero dada la naturaleza de la agricultura que se practica en el sur del país, no se aplican riegos.

El sitio posee un historial de rotación trigo-papa en agricultura de secano, bajo sistema de labranza tradicional con arado de disco y quema parcial del rastrojo del trigo. En forma adyacente y como parches dentro del sector cultivado, existe un bosque nativo en que predominan especies como el Hualle (*Nothofagus obliqua*), Avellano (*Corylus avellana*), Maqui (*Aristotelia chilensis*) y Zarzamora (*Rubus ulmifolius*). Éste posee un tiempo mayor a 20 años sin intervenciones antrópi-

cas. Para efectos del ensayo, se utilizó como enmienda de suelo un ácido húmico (POW Humus, WSG 85%), producido por la empresa alemana HuminTech en base al mineral Leonardita.

Metodología

Manejo del cultivo

El suelo fue preparado en los meses de julio y agosto del año 2014. Previamente, se eliminaron las malezas aplicando una combinación de herbicidas sistémicos, AJAX 50 WP y RANGO 480 SL, en dosis de 10 g ha⁻¹ y 2 L ha⁻¹, respectivamente. Como unidades experimentales se delimitaron parcelas de 20 m² (2 m de ancho y 10 m de largo) con la utilización de estacas y se preparó el suelo con una rastra de púas, un arado de discos y nuevamente un rastraje de púas, obteniéndose un buen mullimiento. Posterior al primer rastraje de púas, se aplicó ácido húmico en las parcelas correspondientes al tratamiento T1, diluyendo 30 gramos en 20 litros de agua, esparciéndolo uniformemente por toda la unidad experimental con la ayuda de una bomba de espalda. Con esta aplicación, se obtuvo una dosificación a nivel de campo de 15 kg ha⁻¹.

Para la fertilización del predio, se tomó en el mes de Julio una muestra compuesta y se envió a analizar a laboratorio. En base a los resultados, se aplicó una fertilización nitrogenada de urea, parcializándola en tres momentos: 20% siembra, 40% inicio de macolla, 40% fin de macolla, aportando un total de 140 kg N ha⁻¹

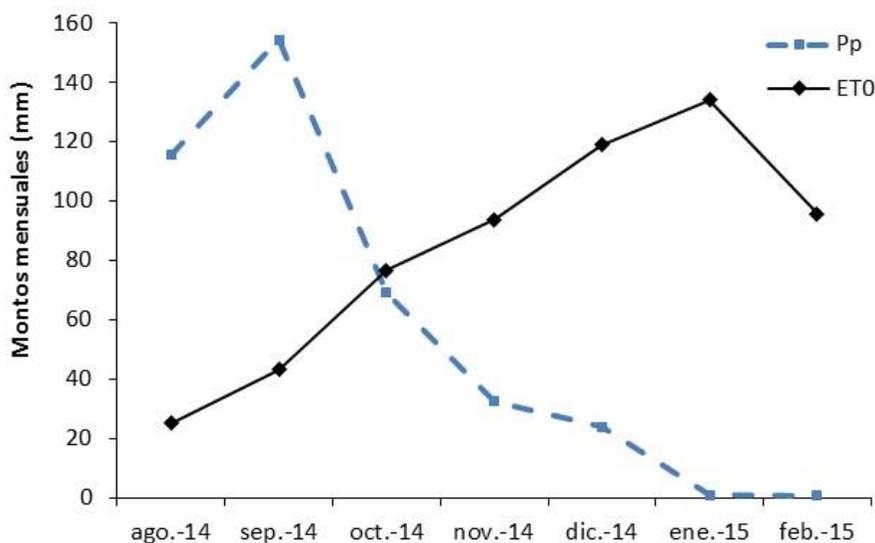


Figura 1. Valores mensuales de precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ET0) de la Comuna de Teodoro Schmidt durante el ensayo.

Figure 1. Monthly values of precipitations (Pp) and reference evapotranspiration (ET0) in Teodoro Schmidt neighbourhood during the essay.

calculado en base a un rendimiento teórico de 7.500 kg ha⁻¹. Además, se aplicaron 77 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 16 kg ha⁻¹ de K₂O.

La siembra, realizada el día 15 de agosto del año 2014, se realizó de forma mecanizada, con una dosis de 250 kg ha⁻¹ de semilla de trigo (*Triticum aestivum*) no certificada de la variedad Otto Baer. Por último, la cosecha se realizó el día 7 de febrero de manera mecanizada con la utilización de una cosechadora John Deere y una tolva para el traslado del trigo y su embolsado.

Tratamientos de manejo

Los tratamientos consideraron un control (T0), siembra de trigo sin aplicación de ácido húmico al suelo; tratamiento T1, siembra de trigo con aplicación de ácido húmico en una dosis de 15 kg ha⁻¹ y tratamiento T2, suelo nativo, sin intervención antrópica. Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones.

Se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0-10 cm y 30-40 cm, seleccionadas en función de la densidad de enraizamiento, ya que según Wilson y Valenzuela (1998), en sistemas agroecológicos con abundantes precipitaciones, la mayor densidad del sistema radical del trigo se localiza en los primeros 10 cm de suelo, disminuyendo en forma considerable conforme aumenta la profundidad del mismo. Por otra parte, el arado de disco tiene efectividad sobre los primeros 20 cm de suelo, por lo cual las profundidades seleccionadas permiten inferir sobre el efecto de la preparación del suelo en la incorporación del producto y la posible existencia de un pie de arado.

El muestreo se realizó en dos fechas (14 de agosto y 2 de enero), aproximadamente uno y seis meses después de la aplicación del ácido húmico, con el fin de contrastar una situación de invierno con aporte de precipitaciones respecto a una situación de verano, en ausencia de éstas. Además, las fechas fueron elegidas para ver el efecto del cultivo sobre el suelo, ya que las mediciones se ajustan al inicio y fin del ciclo del trigo.

Evaluaciones

A modo de caracterización del suelo, en la primera fecha (agosto de 2014) se midió la textura por el método del hidrómetro de Bouyoucos y la densidad real por el método del picnómetro, ambos descritos por Sandoval et al. (2012) y utilizando una balanza de precisión BEL (modelo RS232) de dos decimales, tanto en éstas como en las mediciones de las otras propiedades. Estas evaluaciones no se repitieron en el segundo muestreo (enero de 2015) dado que corresponden a propiedades estables en el tiempo.

Para la evaluación del efecto de los tratamientos, se midió la densidad aparente por el método del cilindro (Sandoval et al., 2012) y la distribución de tamaño

de poros a través de la curva característica, mediante cama de arena, olla y platos de presión (Sandoval et al., 2012). Para esto se utilizaron muestras de suelo sin disturbar obtenidas con cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura. Comenzando con muestras saturadas, las muestras se drenan a tensiones de 0,2; 6 y 33 kPa de presión en cama de arena y plato de presión hasta alcanzar el equilibrio mátrico. Para determinar el contenido de agua a tensiones de 300 y 1.500 kPa se utilizaron muestras de suelo disturbadas en una olla de presión (Sandoval et al., 2012), transformando el contenido de agua en base a masa (Pw) a contenido volumétrico de agua (Pv) mediante la fórmula $Pv = Pw \cdot Da$ donde Da es la densidad aparente determinada por el cilindro. De acuerdo a Sandoval et al. (2012), los poros de drenaje rápido (PDR, >50 µm) se calcularon como la diferencia entre la porosidad total y la porosidad en equilibrio a -6 kPa; los poros de drenaje lento (PDL, 10-50 µm) se calcularon como la diferencia entre el contenido de agua a -6 y -33 kPa, en tanto los poros de agua útil (PAU, 0,2-10 µm) se calcularon como la diferencia entre la retención de agua a -33 y -1.500 kPa.

La estabilidad de los microagregados se determinó mediante el método de la razón de dispersión (RD), que mide el porcentaje de agregados de entre 1 y 2 mm que se dispersan bajo la acción de agua destilada, en una metodología basada en el método del hidrómetro de Bouyoucos, descrito en detalle por Seguel et al. (2003); como el método se basa en la dispersión de agregados, el menor valor denota la mayor estabilidad. Para la estabilidad de los macroagregados se utilizó el método del tamizaje en seco y en húmedo (Hartge y Horn, 2009), el cual permite calcular la variación del diámetro medio ponderado (VDMP) de los agregados. La metodología consiste en pasar la muestra de suelo no disturbada y seca al aire por tamices de tamaños decrecientes (19; 9,5; 6,35; 4,75; 3,35 y 2 mm), para posteriormente tamizarlas sumergidas en agua en el mismo set de tamices. Con las curvas de fracciones acumuladas en seco y saturado se determinó el índice VDMP (Hartge y Horn, 2009), en que el menor valor denota la mayor estabilidad. Dado que post preparación de suelo no se encontraron macroagregados naturales, esta prueba solo se realizó en la segunda fecha de medición.

Para la determinación del rendimiento, una vez alcanzada la madurez fisiológica (febrero de 2015), se tomó el área equivalente a un metro lineal de una hilera de cada unidad experimental (n = 4 por tratamiento sembrado con trigo, esto es, T0 y T1), superficie que se extrapoló a un metro cuadrado para inferir sobre componentes como la materia seca, el peso de granos, el número de granos/espiga, número de espigas/planta y finalmente la producción por hectárea. En una primera instancia se extrajo la biomasa aérea, cortándola a ras de superficie; a partir de ella, se separaron las espigas de las plantas y se contabilizaron. Los tallos de trigo

se llevaron a estufa a 60 °C de temperatura durante 48 h hasta obtener masa constante. Se realizó un pesaje antes y después del secado para obtener los valores de materia fresca aérea y materia seca aérea. Con respecto al peso y número de granos por metro lineal, estos fueron obtenidos desgranando las espigas manualmente, separando las brácteas de las espiguillas y dejando únicamente el grano maduro. Este último fue contabilizado y posteriormente pesado.

Análisis estadístico

Si bien el diseño en campo fue en bloques completos al azar, siendo la pendiente el factor de bloqueo, el análisis estadístico se realizó bajo un modelo de Split-split plot (parcelas subdivididas) con bloques completos al azar con 3 factores de estudio, considerando la dependencia espacial en profundidad de la unidad experimental, de manera de evaluar la interacción de los diferentes factores: manejo (Sin enmienda, aplicación de ácido húmico, suelo nativo), profundidad (0-10 y 30-40 cm) y tiempo de evaluación (uno y seis meses después de la aplicación). En este sentido, el hecho de que no se puedan aleatorizar los niveles de un factor (profundidad) genera una dependencia espacial que debe ser contemplada. La unidad experimental consistió en parcelas de 20 m² de superficie, es decir, de 10 m de largo (en el sentido de la pendiente) por 2 m de ancho. Se analizó si existían diferencias estadísticamente significativas para todas las variables evaluadas bajo el marco teórico de Modelos Lineales Mixtos (MLM). En el caso de existir diferencias significativas entre los tratamientos, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher mediante el software estadístico InfoStat versión 2013 (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial del suelo

De la caracterización inicial se determinó que el suelo posee una clase textural Franca a Franca limosa, lo que coincide con lo indicado por CIREN (2002) para la Serie de suelo Correltúe. Los contenidos de arcilla presentaron los rangos con mayor variabilidad en superficie (10-25%), siendo menores al 7% entre 30 y 40 cm; por su parte la arena fluctuó en rangos del 30 al 50% en ambas profundidades, y el limo alcanzó niveles de entre el 44 y 50% en superficie, aumentando en profundidad hasta un 62%.

La densidad real presentó valores superficiales de 2,60 Mg m⁻³ para los tratamientos con trigo y de 2,37 Mg m⁻³ para el bosque nativo, en tanto en profundidad estos valores se incrementaron a niveles de 2,51 (bosque nativo) a 2,73 Mg m⁻³ (cultivo de trigo). Estos valores se encuentran dentro de rangos esperables para

suelos volcánicos con influencia de minerales de Fe (Schaetzl y Anderson, 2005), aunque el menor valor del bosque en superficie denota la influencia de la hojarasca orgánica (Nissen *et al.*, 2005).

Porosidad y densidad aparente

Respecto a las propiedades de suelo que dependen de los tratamientos, la Figura 2 presenta, a modo de ejemplo, la curva característica de los suelos en la primera fecha de medición, a partir de la cual se puede derivar la distribución de tamaños de poros. Destaca la abundante presencia de poros gruesos, denotados por la pendiente de la curva en el rango de tensiones asociadas a los macroporos (Hartge y Horn, 2009), siendo el tratamiento T0 (siembra de trigo sin enmienda) el que presenta la menor pendiente para ambas profundidades. En este sentido, el tratamiento T1 (siembra de trigo con enmienda) presenta una recuperación estructural post labranza que permite una rápida reestructuración, con el desarrollo de macroporos a bajas tensiones. En este sentido, Dec *et al.* (2017) destacan la alta resiliencia de los suelos derivados de ceniza volcánica, aunque esta será mayor mientras mayor sea el contenido de materia orgánica del suelo.

Por su parte, el Cuadro 1 presenta los resultados del análisis estadístico, destacando la alta significancia de la distribución del tamaño de poros en función de los tratamientos; sin embargo, los poros gruesos de drenaje rápido (PDR) presentaron interacción tratamiento*mes de muestreo. Por su parte, los poros de drenaje lento (PDL) presentaron una triple interacción (tratamiento*profundidad*mes de muestreo) y el agua disponible (AW) junto con la densidad aparente (Da) presentaron interacción tratamiento*profundidad. Los resultados de dichas comparaciones se presentan en la Figura 3.

La densidad aparente (Da) es una propiedad dinámica del suelo, susceptible a la acción antrópica o a las raíces de las plantas cuando penetran en éste (Reynolds *et al.*, 2009). A pesar que la Da depende, entre otros, de la estructura, el contenido de agua, la mineralogía y la clase textural del suelo, existen valores típicos esperables, que para suelos de origen volcánico y utilizando el método del cilindro, se estiman menores a 0,9 Mg m⁻³, siendo un rango adecuado valores entre 0,3 y 0,95 Mg m⁻³ según Sandoval *et al.* (2012).

Altos contenidos de materia orgánica favorecen niveles de densidad aparente bajos, como es esperable en el sitio bajo bosque nativo. Al respecto, Fuentes *et al.* (2011) reportan niveles de materia orgánica superficial, en bosques nativos de la zona sur de Chile, que duplican a los niveles encontrados en profundidad; a su vez indican que al cabo de 100 años de actividad agrícola estos niveles disminuyen a menos de la mitad, lo que explica la pérdida de estabilidad estructural, con

incrementos de la Da. Por otra parte, el descenso de la Da en profundidad es característico de los suelos derivados de ceniza volcánica y depende exclusivamente de la mineralogía y la pedogénesis de estos suelos (CI-REN, 2002; Seguel y Horn, 2006). Al respecto, destaca el efecto del ácido húmico en profundidad, cuya Da fue similar a la del sitio de bosque nativo, siendo significativamente menores incluso que los valores superficiales y manteniéndose el sitio control con altos niveles de Da en todo el perfil. Kolodziej *et al.* (2016) destacan la

capacidad del lignito a base de leonardita de disminuir la densidad aparente al ser aplicado en altas dosis, no existiendo en la literatura reportes de efectos significativos en dosis bajas. En este sentido, la interacción del ácido húmico con la materia orgánica nativa del suelo pudo potenciar la respuesta al promover una activación microbiológica que favoreció la regeneración estructural en profundidad (Moreno *et al.*, 2017).

Respecto a la distribución del tamaño de poros, derivados de la curva característica, se observa en la Figu-

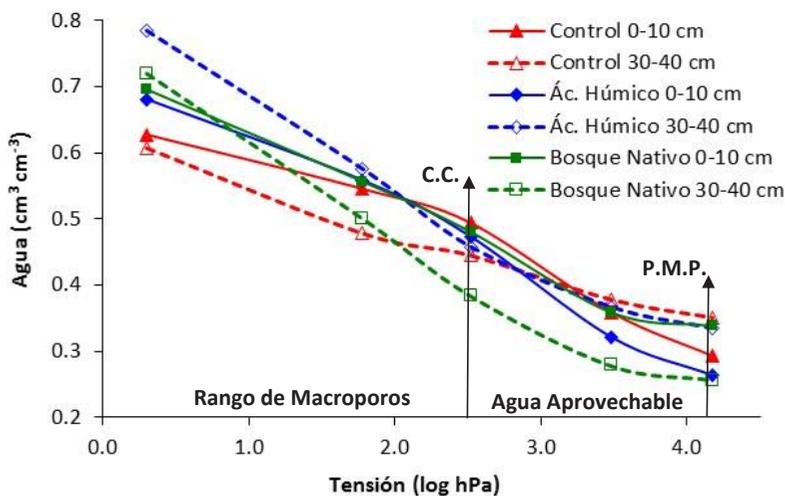


Figura 2. Curvas características de los tratamientos en la primera fecha de evaluación. Se detalla la tensión de agua que delimita los macroporos y los poros de agua aprovechable, donde C.C. es la capacidad de campo (330 hPa de tensión) y P.M.P. es el punto de marchitez permanente (15,430 hPa de tensión).

Figure 2. Water retention curves of treatments in the first-date sampling. The water tension that delimits the macropores and available water is detailed, where C.C. is the field capacity (330 hPa of water tension) and P.M.P. is the permanent wilting point (15,430 hPa of water tension).

Cuadro 1. Significancia estadística de los factores de estudio y diseño factorial (p-valor) derivado para las propiedades físicas de suelo mediante MLM.

Table 1. Statistical significance of the factors studied and factorial designs (p-value) derived on soil physical properties, by MLM.

Fuente de variación	PDR	PDL	AW	Da	RD	VDMP
Tratamiento	0,0674	0,0000	0,0368	0,0000	0,0151	0,0030
Profundidad	0,0013	0,0003	0,3080	0,0000	0,1358	0,2324
Mes	0,0001	0,0006	0,0012	0,7553	0,1387	
Tratamiento x Profundidad	0,9218	0,0001	0,0180	0,0006	0,0002	0,1667
Tratamiento x Mes	0,0409	0,4932	0,1019	0,6325	0,0011	
Profundidad x Mes	0,1095	0,1283	0,0000	0,1681	0,0085	
Tratamiento x Profundidad x Mes	0,4879	0,0065	0,1861	0,4324	0,2908	

PDR: Poros de drenaje rápido; PDL: Poros de drenaje lento; AW: Agua aprovechable; Da: Densidad aparente; RD: Razón de Dispersión; VDMP: Variación del diámetro medio ponderado.

ra 3 que los poros de drenaje rápido (PDR) presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en la medición de agosto, con mayor porosidad gruesa en los tratamientos de bosque nativo y ácido húmico, los cuales superaron en aproximadamente un 62% al tratamiento control, situación que no se presentó a la cosecha (enero), donde el control aumentó su macroporosidad, posiblemente como consecuencia del crecimiento de raíces en profundidad que vino a revertir el efecto de las cargas mecánicas asociadas a la preparación del suelo (Usowicz y Lipiec, 2009).

A nivel de propiedades físicas, el suelo debe asegurar el adecuado suministro de aire y agua para los cul-

tivos (Letey, 1985), requiriéndose un mínimo de un 8% de PDR para mantener un adecuado intercambio de gases hacia el sistema radical (Horn y Fleige, 2009). En este sentido, al cabo de un mes de realizada la labranza, el tratamiento control (T0) se encontraba con el límite de poros gruesos para asegurar un correcto desarrollo del cultivo, en tanto el tratamiento con ácido húmico y el sitio nativo presentaban valores adecuados y similares entre sí. Sin embargo, al transcurrir la temporada, los ciclos de humectación y secado favorecieron la recuperación estructural del suelo (Seguel y Horn, 2006), al punto que el tratamiento T0 incrementó los macroporos y desaparecieron las diferencias entre los trata-

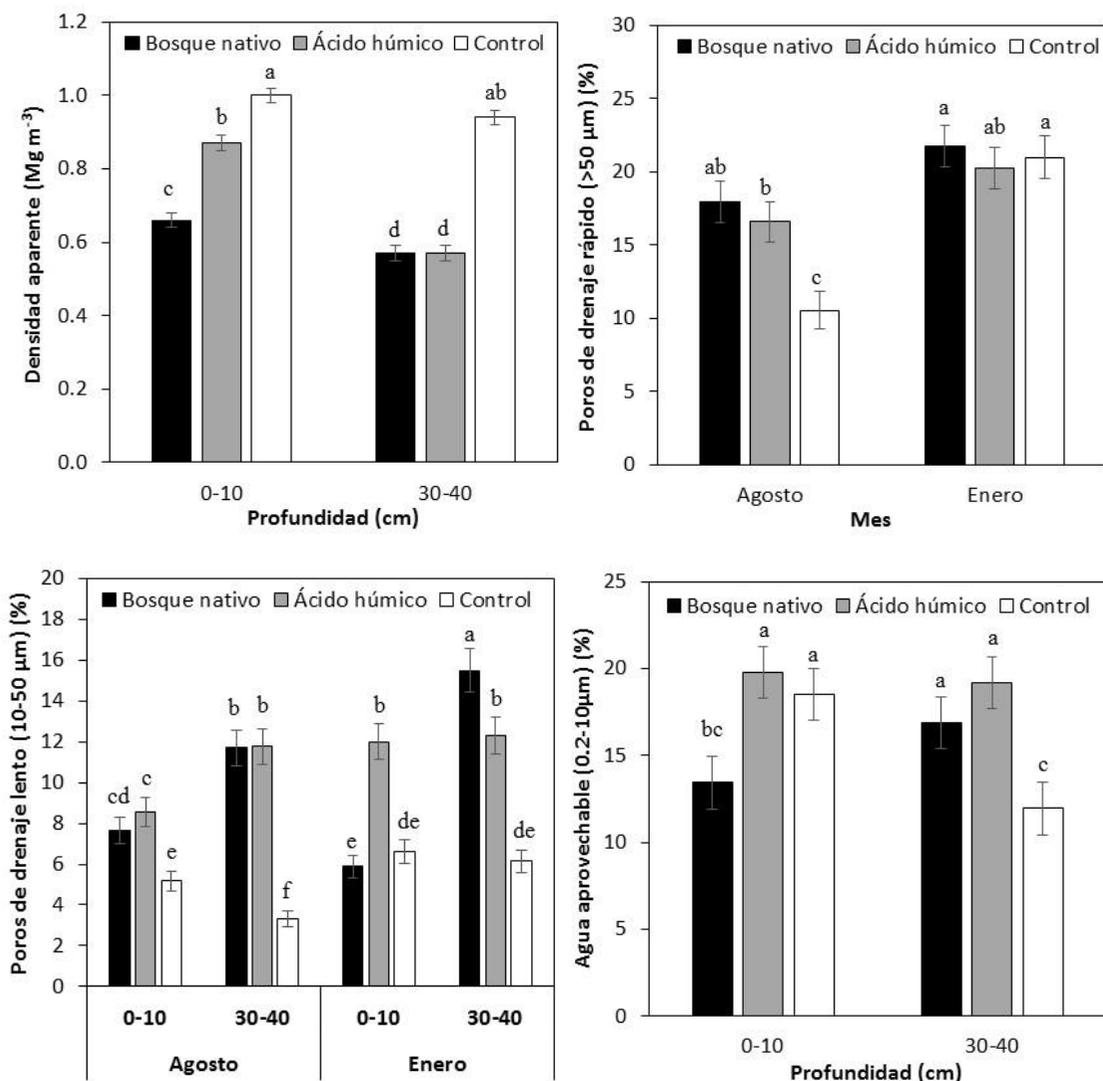


Figura 3. Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) y distribución de tamaño de poros (%) según tratamientos a diferentes profundidades y/o mes de muestreo. Barras con diferente letra son significativamente diferentes con $p \leq 0,05$ para las comparaciones múltiples del test LSD de Fisher. Las líneas verticales representan el error estándar.

Figure 3. Bulk density ($Mg\ m^{-3}$) and pore size distribution (%) according to treatments at different depths or/and month. Bars with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ by Fisher's LSD test for multiple comparisons. Vertical lines represent standard error.

mientos. Este fenómeno ya ha sido descrito para suelos de origen volcánico bajo diversas condiciones de uso y manejo (Dörner et al., 2009b; Dec et al., 2017), lo que es indicador de su alta capacidad de resiliencia.

En cuanto a los poros de drenaje lento (PDL), en todas las situaciones la aplicación de ácido húmico mejoró la condición porosa del suelo, equiparándolo a valores similares al bosque nativo y superando en más de un 50% los valores del control. Los PDL juegan un rol dual para los requerimientos de las plantas, ya que contribuyen a drenar el exceso de agua del suelo, favoreciendo la aireación hacia el sistema de raíces, pero a una tasa menor que los PDR, por lo que se constituyen en un aporte de agua muy fácilmente disponible para la etapa inicial de evapotranspiración de los cultivos posterior a una lluvia o un riego (Reynolds et al., 2009). En este sentido, el control presentó valores de PDL bajos y estables, tanto espacial como temporalmente, a diferencia del bosque nativo y el tratamiento con ácido húmico, que presentaron un dinamismo temporal dependiente de la profundidad del suelo.

Con respecto al agua aprovechable (AW), los resultados variaron según la profundidad de muestreo, con menores valores del bosque nativo en superficie y un 30% mayor contenido de AW en el tratamiento con ácido húmico con respecto al control entre los 30-40 cm de profundidad. Este parámetro da una idea de la capacidad de estanque de agua del suelo, primordial en la agricultura de secano, ya que implica una mayor disponibilidad de agua durante los meses secos.

Al respecto, considerando los datos de la Figura 1 y la capacidad de almacenamiento de agua aprovechable del suelo, se realizó un balance hídrico, del que se dedujo que el control presenta déficit hídrico a partir de finales del mes de noviembre. Para el caso del tratamiento con aplicación de ácido húmico, este estrés se retrasa hasta mediados de diciembre, lo que genera una mejor condición para el cultivo al momento del llenado de granos. La mayor capacidad de retención de agua aprovechable con aplicaciones de ácido húmico ya había sido descrita previamente (Kolodziej et al., 2016), por lo que su utilización puede ser una herramienta eficaz para aumentar la producción de biomasa y los rendimientos en sistemas de secano de la zona cordillerana de la costa de Chile, los cuales poseen restricciones naturales y un alto riesgo de degradación (Brunel-Saldías et al., 2016).

Estabilidad de agregados

Los resultados de las pruebas de estabilidad de agregados arrojaron significancia para el factor tratamiento, en el caso de los macroagregados (evaluados sólo a cosecha) e interacciones tratamiento*mes y tratamiento*profundidad para el caso de los microagregados (Cuadro 1). El Cuadro 2 presenta los resulta-

Cuadro 2. Estabilidad de macro-agregados (VDMP, promedio ± DS) en función de los tratamientos y la profundidad para la segunda fecha de muestreo. Letras diferentes denotan diferencias significativas (p = 0,003).

Table 2. Macro-aggregate stability (VDMP, average ± SD) according to treatments and depths during the second sampling date. Different letters denote significant differences (p = 0.003).

Tratamiento	VDMP (mm)		
	Profundidad (cm)		Media
	0-10	30-40	
Control (T0)	1,09 ± 0,36	2,50 ± 0,57	1,80 ± 0,342 a
Acido húmico (T1)	1,02 ± 0,30	0,81 ± 0,47	0,92 ± 0,316 a
Bosque nativo (T2)	0,01 ± 0,00	0,00 ± 0,01	0,00 ± 0,003 b

dos para la prueba de estabilidad de macroagregados, en tanto la Figura 4 presenta los resultados de microagregados. En ambos casos, valores menores denotan mayor estabilidad de agregados.

La estabilidad de macro agregados no presentó diferencias entre la aplicación de ácido húmico y el control, aunque en profundidad (30-40 cm) T1 mostró una tendencia a ser más estable (menor VDMP) que T0. Cabe destacar que el valor alcanzado por el sitio de bosque nativo confiere al suelo una extraordinaria estabilidad de sus agregados, lo que responde a la alta actividad biológica esperable en sitios no intervenidos (Lupwayi et al., 2001; Seguel et al., 2015).

En general, los valores de VDMP obtenidos en este estudio distan bastante de los valores típicos mostrados por suelos de la zona centro norte del país. Según Mendoza (2014), en un estudio que incluyó cuatro series de suelo de textura contrastante, el VDMP en suelos de la zona centro del país fluctúa entre 5,79 y 7,93 mm para suelos arados, y entre 0,7 a 3,73 mm en suelos sin intervención, valores que fácilmente doblan los obtenidos en este estudio y que reflejan la excelente condición estructural de estos suelos (Fuentes et al., 2011). La estabilidad de macroagregados depende fuertemente de los residuos frescos que se aportan al suelo (Brunel-Saldías et al., 2016), lo que en este caso constituiría un indicador de calidad cercano al óptimo para el sector bajo cultivo, indistintamente si recibió o no el aporte de ácido húmico.

Con respecto a los microagregados del suelo (Figura 4), la relación de dispersión muestra diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en función de la profundidad y la fecha de muestreo, destacando el tratamiento con ácido húmico con la menor estabilidad en superficie y para la primera medición, aunque las diferencias desaparecen en profundidad y con el transcurso de la temporada, lo que no coincide

con los resultados de Imbufe *et al.* (2005), quienes indican una mayor estabilidad de agregados con aplicaciones de ácido húmico. De acuerdo a Brunel-Saldías *et al.* (2016), la RD se correlaciona mejor con factores de estructuración como la arcilla y los óxidos de hierro, más que con el contenido de materia orgánica, por lo que el ácido húmico tendría la facultad de separar los clúster de arcillas (Piccolo, 2002) como parte de su acción para incrementar el agua aprovechable del suelo, lo que en este caso se pudo manifestar como una menor estabilidad según la prueba de laboratorio. Aun así, todos los valores fueron muy estables y dentro de los rangos esperables según Fuentes *et al.* (2013).

Componentes de rendimiento

El Cuadro 3 presenta los componentes de rendimiento para los tratamientos cultivados con trigo (Con-

trol y Ácido húmico), evaluados en un metro lineal por repetición y llevados a unidad de superficie en función de la distancia entre hileras.

No existieron diferencias estadísticamente significativas en la producción de trigo por efecto de la aplicación de ácido húmico, pero se observa que existe una tendencia a aumentar el rendimiento en un 24% con respecto al control, lo que destaca la acción de la enmienda como una alternativa concreta para alcanzar el potencial productivo de los cultivos, más aun considerando el costo de la aplicación (CLP \$ 150.000 ha⁻¹ al año 2019). Aun así, los resultados de ambos tratamientos fueron mayores a lo esperado en base al área agroecológica de la Región de la Araucanía, los cuales según ODEPA (2015) alcanzan los 53,2 qq ha⁻¹ en promedio.

Destaca la menor variabilidad en el rendimiento del tratamiento con ácido húmico, el cual alcanzó valores de error estándar de 10,2 y 4,6 qq ha⁻¹ para el control y

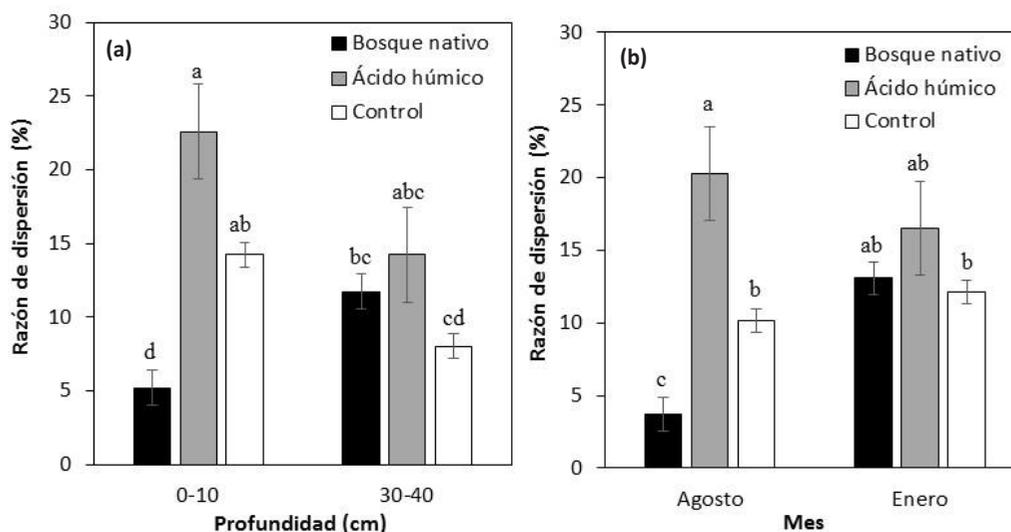


Figura 4. Estabilidad de micro-agregados (RD, promedio \pm DS) de los tratamientos en función de la profundidad (a) y fecha de muestreo (b). Letras diferentes denotan diferencias significativas.

Figure 4. Micro-aggregate stability (RD, average \pm S D) of treatments according to depths (a) and date of sampling (b). Different letters denote significant differences.

Cuadro 3. Componentes de rendimiento y rendimiento de grano y rastrojo de los tratamientos con cultivo de trigo. Valores promedio \pm EE.

Table 3. Components of yield and yield of grain and stubble of treatments cultivated with wheat. Average \pm EE.

Tratamiento	Espigas (# m ⁻²)	Granos (# m ⁻²)	Granos por espiga	Masa de 1000 granos (g)	Rendimiento (qq ha ⁻¹)	Masa de rastrojo (kg ha ⁻¹)
Control	103 \pm 9,3	2.923 \pm 211 b	29 \pm 1,7 b	47,3 \pm 1,1	92,3 \pm 10,2	108,3 \pm 9,4 b
Ácido húmico	108 \pm 2,8	3.697 \pm 211 a	34 \pm 0,7 a	46,4 \pm 1,1	114,5 \pm 4,6	162,3 \pm 9,4 a
Significancia (p-valor)	0,5961	0,0809	0,0572	0,6158	0,1405	0,0265

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) mediante comparación con MLM.

el tratamiento con enmienda, respectivamente; es decir, este último logra un cultivo mucho más homogéneo, con un coeficiente de variación (CV) de 8%, versus el CV de 22% en el control. La mayor homogeneidad del tratamiento con ácido húmico podría relacionarse a una mayor estabilidad de los rendimientos en el tiempo, tal como plantea Pan *et al.* (2009), quienes señalan que los manejos del suelo con enmiendas orgánicas producen como efecto secundario una mayor estabilidad temporal, generando menores efectos negativos a causa de estreses ambientales o malos manejos agrícolas.

La mejor condición física en el tratamiento con ácido húmico, con un equilibrio en las fracciones de agua y aire, generó 50% más de biomasa en relación al control, con las consecuencias en la captura de C y la protección del suelo frente a la erosión (Jordan *et al.*, 2010). A su vez, favoreció la fecundación y el posterior llenado de granos, con 34 granos por espiga, versus 29 granos por espiga en el control, lo que resultó en una mayor densidad de granos m⁻², sin diferencias en el número de macollos ni en la masa de 1.000 granos.

Resultados de mayor rendimiento de cultivos con aplicaciones de ácido húmico al suelo han sido reportados por otros autores (Al-Karawi y Al-Rawi, 2016; Moreno *et al.*, 2017) como consecuencia de un mayor desarrollo de raíces (Zandonadi *et al.*, 2007; Marqués *et al.*, 2008) y por efectos sobre la absorción de nutrientes (Khalid *et al.*, 2013), con efectos directos sobre los componentes de rendimiento. El presente estudio complementa los resultados previos, confirmando que la aplicación de ácido húmico se proyecta como una herramienta práctica para aumentar la sustentabilidad de los cultivos de secano, al asegurar una mayor disponibilidad hídrica que permite sustentar un mayor número de granos por espiga.

CONCLUSIONES

El uso de una enmienda a base de ácido húmico en un Haplohumult de la zona sur de Chile cultivado con trigo, generó beneficios directos a las propiedades físicas del suelo, con disminución de la densidad aparente e incrementos tanto de la porosidad gruesa como de la retención de agua aprovechable por el cultivo. Este efecto se vio hasta una profundidad de 40 cm y persistió al cabo de 6 meses de realizada la aplicación. El mejor equilibrio agua-aire promovido en el suelo por efecto del ácido húmico favoreció el llenado de granos por espiga, sin afectar el peso del grano, lo que se tradujo en una mayor producción de biomasa y en una tendencia a presentar un 24% de mayor rendimiento respecto al control sin enmienda.

REFERENCIAS

Al-Karawi, H., Al-Rawi, W., 2016. Effect of foliar application of organic extract and humic acid application on straw-

berry production. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 47 (3), 749–756.

Baldotto, L., Baldotto, M., Giro, V., Canellas, L., Olivares, F., Bressan-Smith, R., 2009. Desempenho do abacaxizeiro 'Vitória' em resposta aplicação de ácidos húmicos durante a aclimatação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33, 979–990.

Blum, W., Schad, P., Nortcliff, S., 2018. *Essentials of Soil Science*. Borntraeger Science Publishers. Stuttgart, Germany.

Brunel-Saldías, N., Martínez, I., Seguel, O., Ovalle, C., Acevedo, C., 2016. Structural characterization of a compacted alfisol under different tillage systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16 (3), 689–701. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000050>.

Canellas, L., Zandonadi, D., Olivares, F., Façanha, A., 2006. Efeitos fisiológicos de substâncias húmicas-o estímulo às H⁺-ATPases. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 7, 175–200.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), 2002. Estudio Agrológico IX Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N° 122, Santiago, Chile.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Santiago, Chile.

Dec, D., Zúñiga, F., Thiers, O., Paulino, L., Valle, S., Villagra, V., Tadich, I., Horn, R., Dörner, J., 2017. Water and temperature dynamics of Aquands under different uses in southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 17 (1), 141–154. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000011>.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.

Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2009a. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y función de los poros de un andisol (typic hapludand) del sur de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9 (3), 190–209. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300003>

Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2009b. Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: Effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil & Tillage Research* 106, 45–53. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.09.013>

Dörner, J., Dec, D., Feest, E., Vásquez, N., Díaz, M., 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. *Soil & Tillage Research* 125, 52–60. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.05.019>.

Fuentes, I., Seguel, O., Casanova, M., 2011. Degradación física de suelos de la zona central versus suelos volcánicos del sur de Chile. Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo. Boletín Técnico N° 24. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile, pp. 75–81.

Fuentes, I., Seguel, O., Casanova, M., 2013. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of Central Chile, in: Krümmelbein, J., Horn, R., Pagliai, M. (Eds.), *Soil Degradation*, Catena Verlag, *Advances in GeoEcology* 42, Reiskirchen, Germany, pp. 72–88.

- Hartge, K., Horn, R., 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. E. 4 Auflage. Stuttgart, Germany.
- Havlin, J., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., 2013. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- 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. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.07.015>.
- Imbufe, A., Patti, A., Borrow, D., Surapaneni, A., Jackson, W., Milner, A., 2005. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia. *Geoderma* 125 (3-4), 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.006>.
- Jano, P., 2003. Separation methods in the chemistry of humic substances. *Journal of Chromatography A* 983 (1-2), 1–18. [https://dx.doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)01687-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0021-9673(02)01687-4).
- Jordan, A., Zavala, L., Gil, J., 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81 (1), 77–85. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007>.
- Khalid, S., Qureshi, K., Hafiz, I., Khan, K., Qureshi, U., 2013. Effect of organic amendments on vegetative growth, fruit and yield quality of strawberry. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 26 (2), 104–112.
- Kolodziej, B., Bryk, M., Słowiska-Jurkiewicz, A., Otremba, K., Gilewska, M., 2016. Soil physical properties of agriculturally reclaimed area after lignite mine: A case study from central Poland. *Soil & Tillage Research* 163, 54–63. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.05.001>.
- Letej, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science* 1, 277–294.
- Lupwayi, N., Arshad, M., Rice, W., Clayton, G., 2001. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soil under conventional and zero tillage management. *Applied Soil Ecology* 16 (3), 251–261. [https://dx.doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00123-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00123-2).
- Luzio, W., Casanova, M., Seguel, O., 2010. Suelos de Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Marqués, J., Canellas, L., Silva, L., Olivares, F., 2008. Promoção de enraizamento de microtoletes de cana-de-açúcar pelo uso conjunto de substâncias húmicas e bactérias diazotróficas endofíticas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 1121–1128.
- Mendoza, C., 2014. Validación de tres índices de deterioro estructural en base a las propiedades mecánicas del suelo. Memoria de Tesis, Ingeniero Agrónomo Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 38 p.
- Moreno, J., Ondoño, S., Torres, I., Bastida, F., 2017. Compost, leonardite, and zeolite impacts on soil microbial community under barley crops. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 17 (1), 214–230. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000017>.
- Nissen, J., Quiroz, C., Seguel, O., Mac Donald, R., Ellies, A., 2005. Variación del potencial mátrico durante el movimiento de agua en Andisoles. *Agro Sur* 33 (1), 36–47. <https://dx.doi.org/10.4206/agrosur.2005.v33n1-05>.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), 2015. Cultivos anuales: superficie, producción y rendimientos. <http://www.odepa.cl/wp-content/uploads/2014/08/cultivosAnualesHistorico2.xls>
- Pan, G., Zhou, P., Li, Z., Pete, S., Li, L., Qiu, D., 2009. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131 (3-4), 274–280. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.020>.
- Piccolo, A., 2002. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of húmus chemistry and implications in soil science. *Advances in Agronomy* 75, 57–134. [https://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7).
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C., Yang, X., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics for quantify soil physical quality. *Geoderma* 152 (3-4), 252–263. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>.
- Rodda, M., Canellas, L., Façanha, A., Zandonadi, D., Almeida, D., Guerra, J., 2006. Estímulo no crescimento e na hidrólise de ATP em raízes de alface tratadas com humatos de vermicomposto. I - efeito da concentração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30 (4), 649–656.
- 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, Chillán, Chile.
- Schaetzl, R., Anderson, S., 2005. Soil genesis and geomorphology. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- 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 (Chile)* 63 (3), 287–297. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072003000300008>.
- 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. <https://dx.doi.org/10.1002/jpln.200521854>.
- Seguel, O., Marín, R., 2011. Mejoramiento de propiedades físicas del suelo mediante ácido húmico y rastrojo de trigo. *Red Agrícola* 46, 12–13.
- 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. <https://dx.doi.org/10.4206/agrosur.2015.v43n2-05>.
- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J.I., 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. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000055>.
- Stevenson, F., 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, USA.
- Uribe, J., Cabrera, R., De la Fuente, A., Paneque, M., 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Usovich, B., Lipiec, J., 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compactation: the fractal approach. *Ecological Complexity* 6 (3), 263–271.

- <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.05.005>.
- Vidal, I., Etchevers, J., Fischer, A., 2002. Dinámica del nitrógeno bajo diferentes rotaciones, sistemas de labranza y manejo de residuos en el cultivo. *Agricultura Técnica (Chile)* 62 (1), 121-132. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000100012>.
- Wilson, M., Valenzuela, O., 1998. Evaluación del sistema radi-
cal del cultivo de trigo mediante dos métodos de medición. *Revista Científica Agropecuaria* 2, 29-35.
- Zandonadi, D., Canellas, L., Façanha, A., 2007. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation. *Planta* 225 (6), 1583-1595. <https://dx.doi.org/10.1007/s00425-006-0454-2>.