

Estimación de la curva de retención de agua de un Andisol bajo un cultivo de arándano, a través de funciones de pedotransferencia

Estimation of water retention curve of an Andisol under blueberry crop, through functions of pedotransferency

Yáñez, N.^a, Dec, D.^{a,b*}, Clunes, J.^a, Dörner, J.^{a,b}

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

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

ARTICLE INFO

Keywords:

Pedotransfer function
Porosity
Rosetta
Soil physical properties
Plant available water
Irrigation

Original Research Article,
Soil Science

*Corresponding author:

Nicolás Yáñez, Dorota Dec
E-mail address:
dorota.dec@uach.cl

ABSTRACT

The estimation of the amount of available water for plants through water retention curve under laboratory conditions is impeded by the high spatial and temporal variability of hydraulic properties of soils derived from volcanic ashes. The aim of this study was to estimate the water retention curve through pedotransfer functions (FPTS) in a soil derived from volcanic ash under a blueberry crop. The disturbed and undisturbed samples were taken from 5, 20 and 50 cm depth from an Acrudoxic Hapludand. The water retention curve was measured and then adjusted to the equation proposed by van Genuchten (1980). Besides, the organic matter, texture, bulk density, field capacity and permanent wilting point, were used in pedotransfer functions to estimate the air capacity and the plant available water using the *Rosetta* program. Although the van Genuchten model did not provide a perfect estimation of the bimodal nature of the water retention curve of the Andisol, the pedotransfer functions performed a good estimation of the plant available water. The FPT that showed the best estimation of the water retention curve was that based on both soil texture and bulk density.

RESUMEN

La estimación de la cantidad de agua disponible para las plantas a través de la curva de retención de agua en condiciones de laboratorio, se ve dificultada por la gran variabilidad espacial y temporal que tienen las propiedades hidráulicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas. El objetivo de este trabajo fue estimar la curva de retención de agua a través de funciones de pedotransferencia (FPTS) obtenidas de un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo un cultivo de arándano, utilizando aplicación Rosetta del programa RETC. Las muestras disturbadas y no disturbadas fueron extraídas a 5, 20 y 50 cm de profundidad desde un Acrudoxic Hapludand. Se determinó la curva de retención de agua la que fue ajustada a la ecuación propuesta por van Genuchten (1980). Además, se determinó materia orgánica, textura, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, siendo utilizadas en las funciones de pedotransferencia para la estimación de la capacidad de aire y agua disponible para las plantas a través del programa Rosetta. Aun cuando el modelo de van Genuchten no presentó un ajuste perfecto al carácter bimodal de la curva de retención de agua del Andisol, las funciones de pedotransferencia presentaron un buen desempeño en la estimación del agua disponible para las plantas. La FPT que presenta la mejor estimación de la curva de retención de agua del Andisol estudiado es la que se basa en la textura y la densidad aparente utilizadas en conjunto.

Palabras clave: Rosetta, función de pedotransferencia, propiedades físicas del suelo, agua disponible para las plantas, riego.

INTRODUCCIÓN

La producción de arándanos (*Vaccinium corymbosum* L.) en Chile se concentra principalmente desde la Región del Maule hasta la Región de Los Lagos (Hirzler y Rodríguez, 2003), donde predominan los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles). Estos suelos constituyen cerca del 60% de superficie arable en Chi-

le (Besoain y Sepulveda, 1985) y se caracterizan por tener una alta porosidad total (60-70%) y de capacidad de almacenamiento de agua (Dörner *et al.*, 2009; 2013). Estas propiedades están asociadas a una alta capacidad de conducción de agua en condiciones no saturadas, dando origen a su rápida capacidad de secado (Ellies, 1978; Dörner *et al.*, 2009). Lo anterior produce la necesidad de realizar aplicaciones de riego con ma-

yor frecuencia, de manera de cubrir los requerimientos del cultivo y expresar así su máximo rendimiento. Retamales y Hancock (2012), señalan que el estrés hídrico generado por un déficit o exceso de agua puede provocar cambios fisiológicos en el arándano, los que desencadenan la disminución en rendimiento y la calidad de la fruta.

Una estrategia para resolver el problema de estrés hídrico es el desarrollo de un riego sitio-específico, reconociendo que el suelo es un medio poroso que almacena una cantidad limitada de agua accesible para las plantas, además de presentar una alta variabilidad espacial (Patil y Rajput, 2009; Dec y Dörner, 2014). Una de las alternativas para estimar la cantidad de agua disponible para el cultivo es la determinación de la curva de retención de agua (CRA). La CRA describe la capacidad del suelo para almacenar agua a diferentes tensiones, entregando información necesaria para el cálculo de la lámina de riego y el agua disponible para las plantas, que se encuentra entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), correspondiente a θ_{60} y θ_{15430} hPa para Andisoles (Hartge y Horn, 2009; López et al., 2013). Para determinar la CRA existen métodos directos en condiciones de laboratorio y métodos indirectos, que utilizan funciones de pedotransferencia (FPTs) dentro de un modelo predictivo para la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo (Rawls et al., 1991; van Genuchten et al., 1991; Schaap et al., 2001).

Estas funciones se estiman a partir de información básica (Casanova et al., 2003), como la clasificación textural, densidad aparente, contenido de materia orgánica y distribución de tamaño de partículas (Wösten et al., 1999), información topográfica (Pachepsky et al., 2001; Romano y Palladino, 2002) o propiedades mecánicas (Pachepsky et al., 1998). Por otro lado, la naturaleza empírica de las FPTs restringe su uso solo a la región en que fueron desarrolladas, señalándose que cualquier extrapolación necesita una validación (Patil y Rajput, 2009). En este sentido, la ecuación de van Genuchten (1980) que describe la relación entre presión (h) y contenido de agua del suelo (θ), ha sido reconocida por varios autores (Nielsen et al., 1983; Tomasella et al., 2000; Schaap et al., 2001; Dexter, 2004; Vereecken et al., 2010) como aquel modelo (a través del programa RETC) que tiene el mejor desempeño en la estimación de la CRA. Existen distintos software que permiten hacer estas estimaciones, entre ellos el RETC, que en su estructura tiene incorporado el programa *Rosetta* (Schaap et al., 2001), el cual permite estimar los parámetros de la CRA, conductividad hidráulica saturada (K_s) y la conductividad hidráulica en fase no saturada (K_{ns}) a través de un enfoque jerarquizado de FPTs como información de entrada. Estas funciones (H1- H5), detalladas en el Cuadro 1, son divididas en dos modelos que consideran: i) clase textural (H1: ba-

sado en la clasificación textural USDA) y ii) continuo de funciones de pedotransferencia basado en análisis de redes neuronales artificiales (H2: porcentaje textural; H3: $Da + H2$; H4: $\theta_{60} + H3$; H5: $\theta_{15430} + H4$) (Rubio et al., 2008; Schaap et al., 2001). Según Patil y Rajput (2009), el programa *Rosetta* tiene como principal característica su fácil utilización y una gran base de datos de variados tipos de suelos (2.134 curvas de retención de agua, con 20.574 puntos θ (h)), siendo el programa más utilizado para la estimación de parámetros de la ecuación de van Genuchten basado en FPTs (Schaap et al., 2001).

Es así como, basados en la necesidad de mejorar las herramientas de decisión para el manejo del riego, el objetivo de este estudio fue estimar la curva de retención de agua a través de FPTs obtenidas para un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo un cultivo de arándano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el "Fundo Rucapichio" perteneciente a la empresa PI-BERRY, ubicado a 45 km al norte de la ciudad de Valdivia, en la Comuna de Máfil (39°38'S, 72°57'W), Provincia de Valdivia, Región de Los Ríos. El suelo corresponde a un Andisol de la Serie Llastuco, el cual pertenece a la Familia de los Acrudoxic Hapludands (Soil Survey Staff, 2010). Estos suelos se formaron sobre tobas con diferentes grados de cementación, mezcladas con clastos alterados, generando una estrata que provoca restricciones al enraizamiento, localmente conocida como cancagua. Suelos profundos, presentando variación de la serie (color y textura) entre los 34 a 86 cm. Poseen una ubicación depresional a una altura entre 30 y 45 m.s.n.m., ocupando una posición de lomajes y terrazas aluviales o remanentes, con pendientes que van del 1 al 3%. Además presentan una textura que varía de franco limosa en superficie a arcillosa en profundidad (CIREN, 2003).

Se recolectaron muestras disturbadas y sin disturbar dentro del cultivo de referencia (cultivo de arándano: variedad Elliot, marco de plantación: 3,2 m x 0,33 m) a tres profundidades (5, 20 y 50 cm). Las primeras se extrajeron con el objetivo de determinar las características descriptivas del suelo (%MO, textura y Dr), mientras que las segundas se obtuvieron con el fin de determinar las características físico-hidráulicas del suelo. Para esta últimas se tomaron cuatro muestras de suelo no disturbadas al azar en cilindros de acero inoxidable de 230 cm³ de volumen (h: 5cm, diámetro: 7cm), sobre 3 hileras del cultivo de arándano, obteniéndose 12 muestras por profundidad para cada sector, sumando un total de 24 muestras por profundidad. Los camellones (altura: 20 cm, ancho: 1m) fueron formados de suelo del sitio, durante trabajos previos al establecimiento del cultivo, cual fue regado con sistema por goteo.

Determinación de propiedades generales del suelo

Se llevaron a cabo análisis para determinar: densidad real (D_r) a partir del método del pesaje sumergido (Sandoval *et al.*, 2012), contenido de carbono orgánico (% MO) (Sadzawka *et al.*, 2006) y distribución de tamaño de partículas mediante el método del hidrómetro propuesto por Day (1965). Todos estos análisis fueron repetidos 3 veces.

Curva de retención de agua (CRA)

Las muestras no disturbadas fueron saturadas por ascenso capilar hasta asegurar que todos los poros del suelo se encuentren llenos con agua. Una vez lograda esta condición, las muestras se drenaron sucesivamente a tensiones de 10, 20, 30 y 60 hPa en bandejas de arena; y a 150, 330 y 500 hPa mediante ollas de presión. Paralelo con la determinación de la CRA se midió la deformación vertical del suelo con un profundímetro (Vernier Caliper, precisión 0,01 mm) de acuerdo a lo indicado en Dörner *et al.* (2010). El volumen de poros finos (<2 μm) fue determinado usando muestras de suelo en cilindros de 20 cm^3 , a una tensión de 15430 hPa en un plato de presión. El contenido de agua fue determinado mediante la diferencia de masa de las muestras, expresadas en relación a su masa seca. Finalmente, el secado en horno a temperatura de 105 °C durante 24 h permitió determinar la densidad aparente (Sandoval *et al.*, 2012).

Determinación de parámetros importantes en el riego

La capacidad de aire (CA, Vol. %) representa la cantidad de macroporos, los cuales poseen un diámetro > 50 μm y es definida como:

$$CA = PT - \theta_{60 \text{ hPa}}$$

Donde: PT (Vol. %) es la porosidad total y θ_{60} es el contenido volumétrico de agua a una presión de 60 hPa (Hartge y Horn, 2009).

Los poros de drenaje rápido (PDR, Vol. %) o macroporos saturados con agua fueron calculados (Dec y Dörner, 2014) como sigue:

$$PDR = \theta_{0 \text{ hPa}} - \theta_{60 \text{ hPa}}$$

Donde: $\theta_{0 \text{ hPa}}$ es el contenido volumétrico de agua a 0 hPa de presión.

El agua disponible para las plantas (ADP, Vol. %) se calculó como:

$$ADP = \theta_{60 \text{ hPa}} - \theta_{15430 \text{ hPa}}$$

Donde: $\theta_{60 \text{ hPa}}$ y $\theta_{15430 \text{ hPa}}$ es el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente (Hartge y Horn, 2009).

Ajuste curva de retención de agua. Este procedimiento se realizó mediante la estimación de los parámetros que describen la curva de retención de agua (θ_s , θ_r , α , n y m) mediante el programa RETC (RETention Curve) v.6.02. Para ello, los datos medidos fueron ajustados a través del modelo propuesto por van Genuchten (1980), seleccionándose adicionalmente el modelo de Mualem (1976) para estimar la conductividad hidráulica no saturada (no presentada en este trabajo).

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m}; \quad m = 1 - \frac{1}{n}; \quad n > 1$$

Donde: θ es el contenido volumétrico de agua; ψ_m es la tensión de agua (hPa); θ_s y θ_r son los contenidos volumétricos de agua en saturación (equivalente a 0 hPa) y residual (equivalente a > 15.000 hPa) respectivamente; α , n y m son parámetros empíricos adimensionales que describen la forma de la curva (van Genuchten, 1980).

Estimación parámetros de ajuste de curva retención de agua. La estimación de los parámetros que describen la CRA a través de funciones de pedotransferencia (FPTs) se realizó a través del programa Rosetta (Schaap *et al.*, 2001), el cual viene integrado en el programa RETC. Se utilizaron 5 niveles de FPTs como información de entrada (Cuadro 1). Las FPT no integra el nivel H1 debido a que solo se obtuvo una repetición de los valores de CA y ADP.

Análisis estadístico. Para el desarrollo de análisis de varianza (ANOVA) simple se utilizó el programa STATGRAPHICS centurión XVII. Se compararon los resultados obtenidos a partir de las distintas FPTs (H1 a H5), considerando el valor efectivamente medido (VM) por profundidad de suelo, por forma separada. En caso de

Cuadro 1. Niveles de información de funciones pedotransferencia.

Table 1. Levels of information of pedotransfer functions.

Nivel de información	Información de entrada
H1	Clase textural (USDA)
H2	% textural (SSC)
H3	SSC + densidad aparente (D_a)
H4	SSC + D_a + θ_{60}
H5	SSC + D_a + θ_{60} + θ_{15430}

encontrar diferencias estadísticamente significativas, se realizó una separación de medias a *posteriori* por Diferencias Máximas Significativas (test de Tukey). El análisis de ajuste de las CRA estimadas se realizó mediante la raíz del error medio cuadrado (RMSE) y el coeficiente de correlación de acuerdo al programa RETC.

RESULTADOS

Caracterización general del suelo

El suelo en estudio posee una textura franco arcillo-limosa en los primeros 20 cm, variando a limoso en profundidad (Cuadro 2). El contenido de limo es mayor al 51,81%, aumentando en profundidad, en cambio el contenido de arcilla y arena disminuyen 21,38% y 3,78% en relación al contenido respectivo de los 5 cm. La densidad aparente aumenta en profundidad, de 0,58 Mg/m³ a 0,63 Mg/m³ a los 50 cm de profundidad, en tanto la materia orgánica disminuye de 16,15% en superficie a 5,76% en profundidad.

Determinación de la capacidad de almacenamiento de agua a través de análisis de laboratorio

La CRA no presentó diferencias entre ambos sectores muestreados dentro del cultivo, por lo que se utilizó

el promedio de ambos sectores para determinar la CRA (Figura 1). En general, las tres profundidades presentan una curva de retención de agua con un marcado carácter bimodal y punto de inflexión en pF 1,7, generando dos sigmoideas, una de pF 0 a pF 1,78 (0-60 hPa) y otra > pF 1,78 (60 - 15430 hPa). Por otro lado, la CRA para 20 cm presenta un mayor volumen de agua en todos los puntos de tensión, excepto en PMP, en comparación a 5 y 50 cm, las cuales no presentaron diferencias entre sí.

La distribución de poros a 20 cm presentó el menor volumen de CA y PDR, con 10% menos de CA en comparación a 5 y 50 cm, y 12% menos de PDR en relación a 50 cm (Cuadro 3). Al contrario, a 20 cm de profundidad se presentó el mayor valor ADP, exhibiendo una diferencia mayor al 10% en comparación a las otras profundidades.

Ajuste de la curva de retención de agua del suelo a través del programa RETC

El modelo se ajusta apropiadamente a las características hidráulicas del suelo, presentando una correlación de R² ≥ 0,96 para las tres profundidades (Cuadro 4), donde la CRA de 20 cm obtuvo la mejor correlación (Figura 2). A pesar del buen ajuste logrado, destaca que: i) en las tres profundidades estudiadas el valor de θ_s presentó un 10% menor en comparación al conte-

Cuadro 2. Características generales de la Serie Llastuco
Table 2. General characteristics of the Llastuco soil series

Profundidad [cm]	Textura			Da [Mg/m ³]	MO [%]
	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]		
5	17,86±3,71	51,81±4,05	30,33±1,11	0,58±0,03	16,15±0,63
20	14,08±2,08	61,55±1,03	24,37±1,11	0,58±0,02	12,31±0,19
50	14,50±5,23	76,55±5,21	8,95±0,06	0,63±0,02	5,76±0,00

Arena: 2000-63 μm; Limo: 63-2 μm; Arcilla <2 μm; Da: Densidad aparente; MO: Materia orgánica; se presentan los valores promedios ± 1 error estándar de los parámetros. Textura y MO presentan (n=3) en cambio Da (n=24).

Cuadro 3. Distribución de poros en función de la profundidad del suelo.

Table 3. Pore distribution depending on the soil depth.

Profundidad [cm]	PT	CA	PDR	ADP
		----- [% Vol.]-----		
5	76,01±0,6	24,20±1,0	13,99±0,6	41,34±0,9
20	76,04±0,8	14,24±1,1	7,59±0,8	52,28±0,9
50	75,25±0,6	24,24±0,8	19,65±0,7	37,97±0,9

PT: Porosidad total; CA: Capacidad de aire; PDR: Poros de drenaje rápido; ADP: Poros agua disponible para las plantas; valores promedio ± 1 error estándar (n=3).

Cuadro 4. Parámetros de van Genuchten de ajuste curva de retención de agua.

Table 4. Van Genuchten parameters for the adjustment of water retention curve.

Profundidad [cm]	θ_r	θ_s	α	n	m	R ²
	-----[m ³ /m ³]-----					[-]
5	0,0	0,61	0,03	1,24	0,20	0,96
20	0,0	0,66	0,01	1,36	0,27	0,98
50	0,0	0,62	0,03	1,23	0,19	0,97

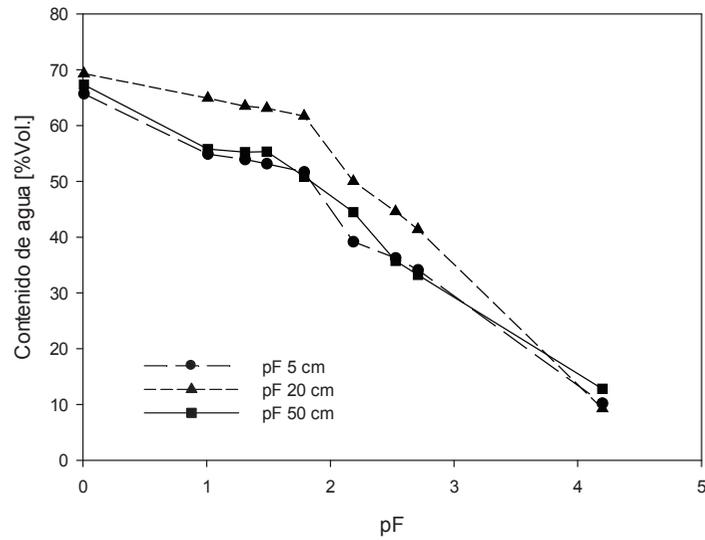


Figura 1. Curvas de retención de agua del suelo para tres profundidades estudiadas. Se presentan valores promedio para cada tensión (n=24).

Figure 1. Water retention curves of soil for the three studied depths. Average values for each stress (n = 24) are presented.

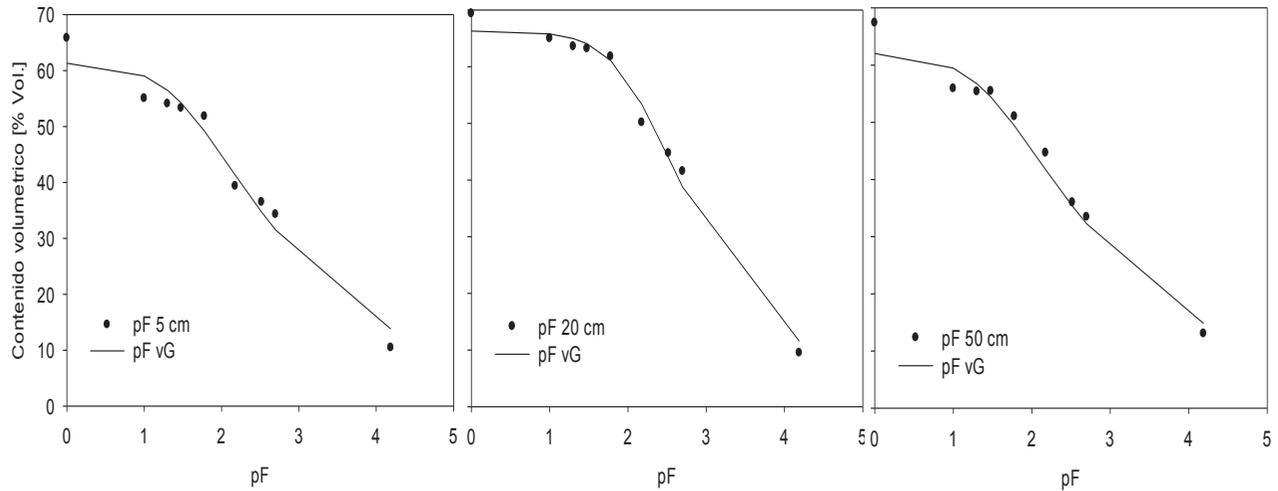


Figura 2. Curvas de retención de agua de tres profundidades del suelo, ajustadas mediante ecuación de van Genuchten (1980).

Figure 2. Water retention curves of the three depths of soil, adjusted by equation of Van Genuchten (1980).

nido en saturación obtenido en laboratorio y ii) el modelo utilizado no representa exactamente los puntos cercanos a saturación (macroporos) pero mejora su desempeño a partir de los 60 hPa (Figura 2).

Evaluación del ajuste de la curva de retención de agua estimada a través de FPTs

El RMSE varió entre 0,04040 y 0,1743, presentando mayor diferencia entre las FPTs a los 20 cm. Para las profundidades de 5 y 50 cm el rango fue de 0,086-0,107 [cm³/cm³] (Figura 3). El coeficiente de correlación fluctúa entre 0,98 y 0,85 (Cuadro 5). El valor más bajo lo obtuvo el nivel H5 para las tres profundidades, en cambio la mejor correlación se obtuvo con la FPT H4 para 5, 20 y 50 cm.

Estimación de la capacidad de almacenamiento de aire y agua del suelo mediante funciones de pedotransferencia

La distribución de poros (CA y ADP) estimada a través de FPTs (H2 - H5) en el programa Rosetta y los valores medidos (VM) por medio de las pruebas de laboratorio muestra que a 5 cm los niveles de FPTs H3, H4 y H5 no presentaron diferencias estadísticas entre sí, pero sí con VM, siendo entre 10% y 8% inferior a este último (p < 0,05), en tanto la FPT H2 sobreestimó este valor (Figura 4). Para la CA a 20 cm de profundidad, la FPTs H2 presentó un aumento de 22% (p < 0,05) en el volumen de macroporos en comparación al valor medido y al resto de las FPTs. En el horizonte más profundo (50 cm) el valor medido de CA no presentó

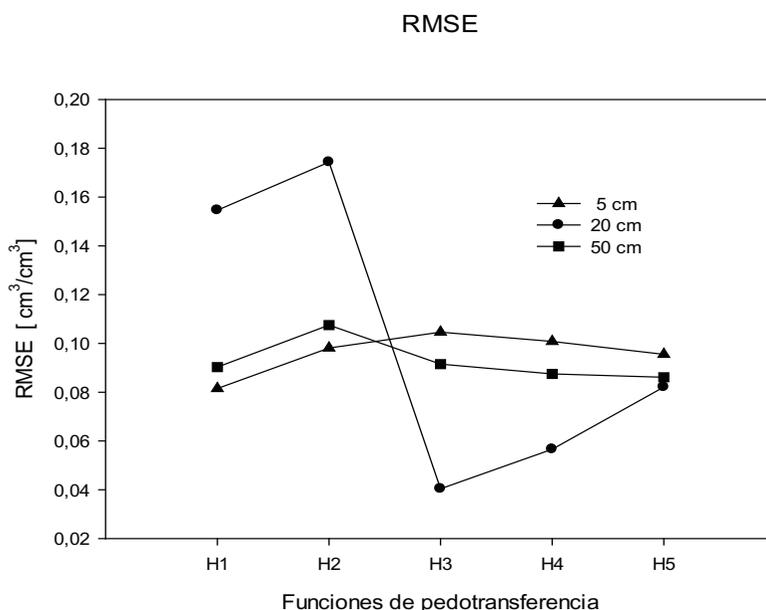


Figura 3. Estimación de la curva de retención de agua mediante RMSE, para las tres profundidades a través de diferentes niveles de FPTs en programa Rosetta.

Figure 3. Estimation of water retention curve by RMSE, for the three depths through different levels of FPTs in Rosetta program.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de las curvas de retención de agua estimadas por FPTs.

Table 5. Correlation coefficients of water retention curves estimated by FPTs.

Profundidad [cm]	Coeficiente correlación				
	H1	H2	H3	H4	H5
5	0,94	0,94	0,95	0,96	0,85
20	0,97	0,97	0,96	0,98	0,85
50	0,95	0,95	0,96	0,97	0,85

diferencias estadísticas con respecto a todas las FPTs. Por otro lado, el volumen de agua disponible para las plantas a 5 cm, sólo el nivel H3 no presentó diferencias significativas con respecto ADP obtenido en laboratorio. Para los 20 cm, los niveles de FPTs desde H3 hasta

H5 estimaron el volumen de ADP entre 35 y 49%, sin presentar diferencias estadísticamente significativas con las mediciones bajo laboratorio. A 50 cm, sólo H5 presentó diferencias ($p < 0,05$) en relación al valor medido.

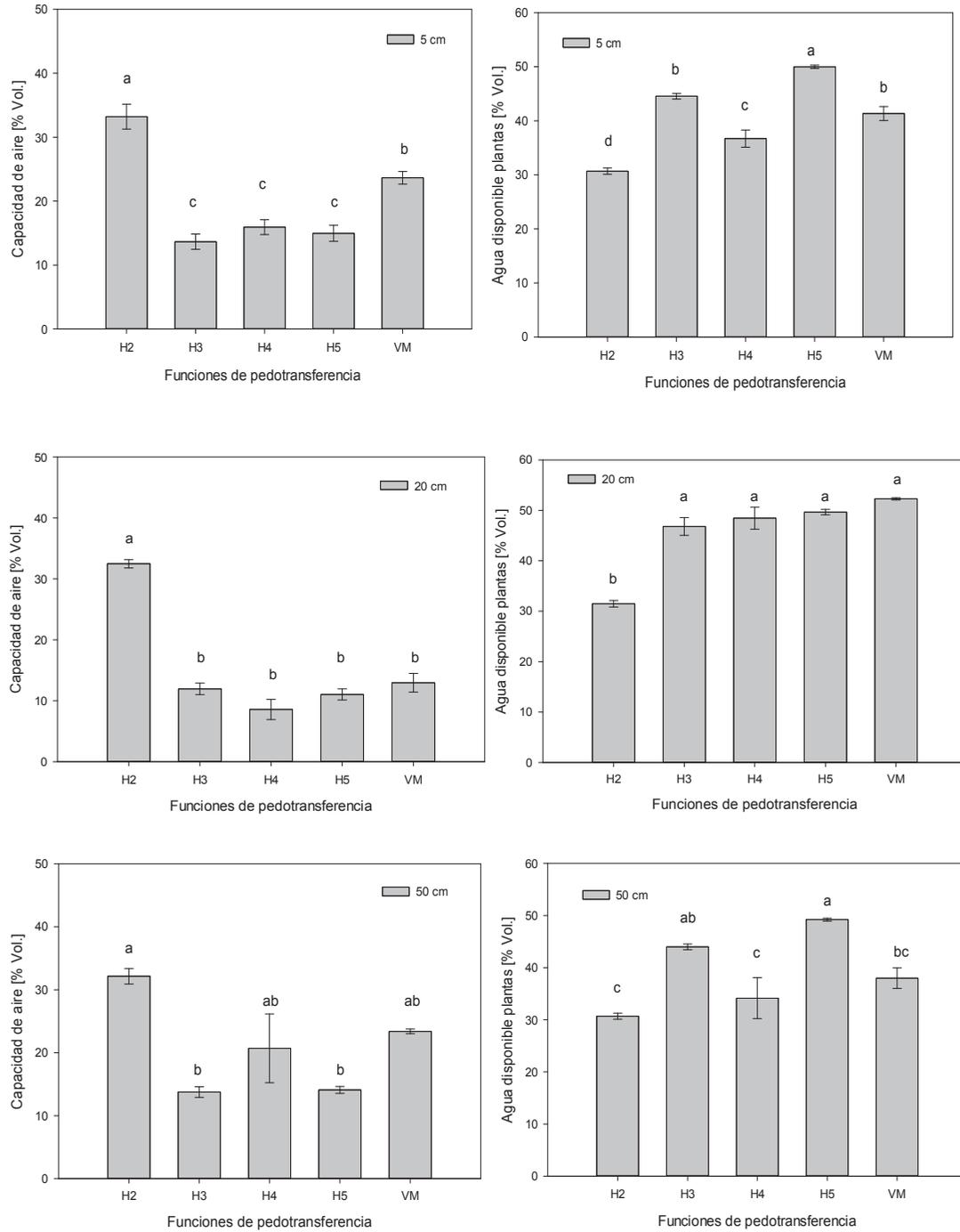


Figura 4. Estimación de capacidad de aire y poros de agua disponible para las plantas para las tres profundidades, a través de funciones de pedotransferencia (H2 a H5) utilizando programa Rosetta. La comparación estadística ($p < 0,05$) incluye el valor medido (VM).

Figure 4. Estimation of air capacity and pores of water available to plants for the three depths, through pedotransfer functions (H2 to H5) using Rosetta program. The statistical comparison ($p < 0.05$) includes the measured value (VM).

DISCUSIÓN

Efecto del establecimiento de un cultivo de arándano sobre la curva de retención de agua

La curva de retención de agua presenta un carácter bimodal (Figura 1), característico de suelos de origen volcánico, lo que ha sido observado y discutido para Andisoles en Chile (Dörner *et al.*, 2010), España (Armas-Espinel *et al.*, 2003) y Japón (Miyamoto *et al.*, 2003). En el primer rango de la curva se observa una menor pendiente en la CRA de 20 cm, provocando una reducción en el volumen de macroporos, afectando la CA y los PDR (Cuadro 3). Esta alteración de los poros estructurales se debe a los labores de subsolado, inversión de suelo y preparación de camellones en el establecimiento del cultivo de arándano, generando la ruptura de agregados, compactación y desconexión de los poros (Dörner *et al.*, 2011). A pesar de estas labores agrícolas necesarias para el establecimiento del cultivo, la CRA de 5 cm presenta un alto volumen de macroporos, los que principalmente se deben a los altos contenidos de materia orgánica y contenidos de arcilla sobre 15% (Cuadro 2). Ambas propiedades tienen un rol fundamental en la formación de estructura del suelo: la MO como agente cementante de partículas de mayor tamaño, y la arcilla, que debido a sus propiedades coloidales favorece la contracción del suelo en la medida que ocurran los ciclos naturales de mojado y secado (Horn y Smucker, 2005). El último mecanismo está asociado a la interacción entre las finas partículas del suelo, que poseen una alta superficie específica y el agua que les recubre con una película, generando en esta manera meniscos de alta cohesión al contacto con otras partículas. Esto a su vez crea una gran atracción que forma grietas, permitiendo de esta forma la agregación del suelo. Si bien esta profundidad presenta mejores características para el desarrollo pedológico, exhibe el mismo volumen de CA e incluso un menor volumen de PDR que las muestras colectadas a 50 cm, esta situación se podría deber a una compactación de los poros generada como consecuencia de labores de cosecha y mantención del huerto.

Si bien la CA que se presenta a 20 cm de profundidad es 10% menor en relación a las de 5 y 50 cm, las tres profundidades presentan valores que se encuentran sobre el rango crítico (< 8%) de CA del suelo para las plantas, presentado por Horn y Fleige (2009) en suelos minerales, e incluso están sobre el valor óptimo (> 14% CA) observado en un Andisol bajo bosque nativo (Dörner *et al.*, 2013). Este último valor demuestra, que independientemente de las variaciones como consecuencia de las labores agrícolas, el suelo presenta las características necesarias para evitar un estrés del sistema radical por hipoxia, al cual el cultivo de arándano es muy sensible (Retamales y Hancock, 2012).

Con respecto al ADP, para 20 cm se presentó el mayor volumen probablemente debido a la redistribución de los poros que redujo el volumen de macroporos favoreciendo el almacenamiento de agua, en comparación a lo observado a 5 cm de profundidad (en el ensayo, especialmente en verano, era evidente la formación de grietas superficiales que es sabido aumenta el volumen de macroporos en desmedro de ADP). Sin embargo, las tres profundidades presentan valores de ADP sobre el rango óptimo (> 20% ADP) presentado por Reynolds *et al.* (2009), dado por un mayor rango que hay entre la CC θ_{60} y PMP θ_{15430} hPa. Los altos contenidos de CA presentados anteriormente confirman que CC θ_{60} es el valor apropiado para estos suelos, determinando una alta CA y generando las condiciones apropiadas de aire y agua para el cultivo.

Evaluación del ajuste de estimación de la curva de retención de agua a través de FPTs

Como se observa en la Figura 3 y el Cuadro 5, las FPTs de H3 y H4 en 20 cm presentan el mejor ajuste de la CRA (RMSE y R²). Esto se debe principalmente a que solo en esta profundidad las FPTs logran una buena estimación de θ_s y los parámetros α y n . Los últimos generan el mayor error entre las estimaciones, ya que definen la forma de la curva: mientras α ajusta la curva en el rango de los macroporos, no ajusta el punto de inflexión y de los poros texturales de la CRA. Lo anterior tiene que ver con el hecho que el ajuste de van Genuchten no logra caracterizar la naturaleza bimodal de las CRA de suelos volcánicos (Dörner *et al.*, 2010). Sin perjuicio de lo anterior, este problema ocurre principalmente en el rango de los macroporos (capacidad de aire), no así a nivel de los poros que almacenan agua útil para las plantas como se aprecia en la Figura 4.

La estimación de la capacidad de aire de las FPTs no presentó un buen desempeño para los 5 cm, pudiendo ser sobreestimado y subestimado el valor medido, debido principalmente a la naturaleza bimodal de la CRA y a los altos contenidos de materia orgánica (MO) que posee esta profundidad (Cuadro 2). El error que genera esta situación se produce como consecuencia de las diferencias que existen entre las propiedades (p.ej.: MO) del suelo investigado y los valores disponibles en la base de datos del programa Rosetta (origen mineral, con bajo contenido de MO).

Tomando en cuenta las profundidades investigadas, no se observaron diferencias estadísticamente significativas para las FPTs de niveles H3, H4 y H5. Esto demuestra, que la integración de CC y PMP al modelo no generaría una mejor estimación de CA, siendo suficiente solo como nivel de información el porcentaje textural y la densidad aparente (H3). Para la estimación de ADP, al igual que en CA, solo se requeriría la FPT H3, coincidiendo con lo demostrado en la Figura 3,

donde esta FPT obtuvo el menor error en la estimación de la CRA. Distinta respuesta observaron Patil y Rajput (2009), donde la mejor estimación de la CRA se obtuvo con la suma de CC como FPT. Esta diferencia entre los estudios probablemente se debe a la utilización de CC a θ_{60} hPa como FPT, mientras cuando en la base de los datos se usa el valor θ_{330} . Si bien para ambos parámetros CA y ADP se obtuvieron estimaciones que presentaron igualdad estadísticamente significativa con respecto al valor medido, ADP presentó menores diferencias en la estimación del valor de laboratorio, demostrando que las FPTs presentan un mejor desempeño en la estimación de la humedad aprovechable para las plantas, generando un método confiable para la planificación del riego en el suelo estudiado. Similares resultados fueron observados por Patil y Rajput (2009), donde utilizando FPTs y el programa Rosetta obtuvieron una buena estimación de CC y PMP.

CONCLUSIONES

El Andisol en estudio presenta una alta capacidad de almacenamiento de agua (>65 %Vol.) en las tres profundidades, observando diferencias en la distribución de poros generado por las labores agrícolas de establecimiento y mantención del cultivo de arándano. A pesar de estos cambios los valores de capacidad de aire y volumen de poros de agua disponible para las plantas se mantuvieron dentro del rango óptimo para el cultivo, siendo además valores representativos para suelos derivados de cenizas volcánicas.

Aun cuando el modelo de van Genuchten no logra reflejar la naturaleza bimodal de las curvas de retención de agua de suelos derivados de cenizas volcánicas, las funciones de pedotransferencia presentaron un buen desempeño en la estimación del agua disponible para las plantas. Sin embargo, considerar solamente la textura del suelo no alcanza para hacer una buena estimación, lo que cambia cuando se considera adicionalmente a la densidad aparente del suelo. Esto es relevante, ya que demuestra que la utilización de las FPTs (comenzando con H3) es una buena opción para estimar parámetros riego (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) exhibiendo ser una buena herramienta en la planificación y uso del agua en el riego.

REFERENCIAS

- Armas-Espinel, S., Hernandez-Moreno, J., Muñoz-Carpena, R., Regalado, C., 2003. Physical properties of "sorriba" - cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma* 117, 297-311.
- Besoain, E., Sepúlveda, G., 1985. Minerales secundarios, in: Tosso, J. (Ed.), *Suelos Volcánicos de Chile*. INIA, Santiago, Chile, pp. 153-214.
- Casonova, M., Seguel, O., Joel, A., Messing, I., Luzio, W., Vera, W., 2003. Funciones de pedotransferencia para conductividad hidráulica en laderas de secano. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 3 (2), 42-48.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. *Estudio Agrológico Xª región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos*. Tomo I. Santiago, Chile.
- Day, P. R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part I. Agronomy 9, ASA and SSSA*. Madison, Wisconsin, pp. 545-567.
- Dec, D., Dörner, J., 2014. Spatial variability of the hydraulic properties of a drip irrigated Andisol under blueberries. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14(3), 589-601.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soils texture, density, and organic matter and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2009. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros de un Andisol (Typic Hapludand) del Sur de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9 (3), 190-209.
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2010. Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma* 159, 189-197.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., Horn, R., 2011. Effect of land use change on Andisol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil and Tillage Research* 115-116, 71-79.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Horn, R., López, I., Leiva, C., Cuevas, J., 2013. Soil changes in the physical quality of an andisol under different management intensities in southern Chile, in: Krümmelbein, J., Horn, R., Pagliai, M. (Eds.), *Soil Degradation. Advances in GeoEcology 42*, Catena Verlag GmbH Reiskirchen, Germany, pp. 262-281.
- Ellies, A., 1978. Algunos aspectos de la hidrofobicidad de los suelos derivados de cenizas volcánicas. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 2(2), 344-365.
- Hartge, R., Horn, R., 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage*. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart.
- Hirzel, J., Rodríguez, N., 2003. Necesidades nutricionales y fertilización del cultivo de arándano en etapa productiva. Informativo agropecuario bioleche, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)-Quilamapu, Chilla, Chile, pp. 1-3. <http://www2.inia.cl/medios/quilamapu/pdf/bioleche/BOLETIN81.pdf>
- Horn, R., Smucker, A., 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82, 5-14.
- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102, 201-208.
- López, I., Kemp, P., Dörner, J., Descalzi, C., Balocchi, O., García, S., 2013. Competitive strategies and growth of neighboring *Bromus valdivianus* Phil. and *Lolium perenne* L. plants under water restriction. *Journal of Agronomy and*

- Crops Science 199, 449-459.
- Miyamoto, T., Annaka, T., Chikushi, J., 2003. Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of Andisol measured by time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2, 90-97.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3), 513-522.
- Nielsen, D.R., Reichardt, K., Wierenga, P., 1983. Characterization of field measured soil water properties. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proceedings of an international symposium on isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies jointly organized by the international atomic energy agency (IAEA) and the food and agriculture organization of the United Nations and held in aix-en-provence, france, 18-22 april 1983, Vienna, Austria, pp. 55-78. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/15/027/15027596.pdf#page=67
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Gimenez, D., Watt, J. P. C., 1998. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil and Tillage Research* 49, 117-128.
- Pachepsky, Y.A., Timlin, D., Rawls, W.J., 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of American Journal* 65, 460-462.
- Patil, N., Rajput, G., 2009. Evaluation of water retention functions and computer program "Rosetta" in predicting soil water characteristics of seasonally impounded shrink-swell soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (3), 286-294.
- Rawls, W.J., Gish, T.J., Brakensiek, D.L., 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer, New York, pp. 213-230.
- Retamales, J., Hancock, J., 2012. *Blueberries, Crop production science in horticulture*. CAB international, London.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252-263.
- Romano, N., Palladino, M., 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. *Journal of Hydrology* 265, 56-75.
- Rubio, C. M., Llorens, P., Gallart, F., 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *European Journal of Soil Science* 59, 339-347.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Centro de Investigación Regional La Platina. Serie Actas INIA. 34 (1). 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, Chillán, Chile.
- Schaap, M., Leij, F., Van Genuchten, M., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251, 163-176.
- Soil Survey Staff., 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Tomasella, J., Hodnett, M., Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal* 64, 327-338.
- Van Genuchten, M.TH., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44, 892-898.
- Van Genuchten, M.TH., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Oklahoma.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Van Genuchten, M.TH., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal* 9, 795-820.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.