

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DE SUELOS VOLCÁNICOS EN FUNCIÓN DE VARIABLES DE FÁCIL DETERMINACIÓN A CAMPO

LUDMILA LA MANNA^{1-2*}, MANUELA TARABINI¹⁻², FEDERICO GOMEZ¹⁻²⁻³, PEDRO AGUSTÍN NOLI¹⁻², BRAIAN VOGEL¹, CARLOS GUILLERMO BUDUBA¹⁻³

Recibido: 25/10/2017

Recibido con revisiones: 19/02/2018

Aceptado: 04/03/2018

RESUMEN

Los suelos de la Región Andino Patagónica se desarrollan fundamentalmente a partir de cenizas y arenas volcánicas, lo que les otorga propiedades distintivas. El objetivo del presente trabajo fue generar modelos que permitan estimar las constantes hídricas [capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)] en suelos volcánicos, en función de variables de fácil determinación a campo: clase textural estimada al tacto y test de fluoruro de sodio (NaF), el cual permite estimar la presencia de aluminosilicatos no cristalinos. Los datos fueron analizados mediante modelos de regresión cuadrática, considerando la clase textural como variable ordinal independiente (x) y las constantes hídricas como variables dependientes.

Se obtuvieron los siguientes modelos cuadráticos de regresión:

Para suelos con reacción negativa al NaF (i.e., sin aluminosilicatos no cristalinos) ($N = 132$):

$$CC = 47,18 - 4,09 * x + 0,13 * x^2 (R^2 = 0,52)$$

$$PMP = 30,46 - 3,52 * x + 0,13 * x^2 (R^2 = 0,53)$$

Para suelos con reacción positiva al NaF (i.e., con aluminosilicatos no cristalinos) ($N = 211$):

$$CC = 35,50 + 1,26 * x - 0,23 * x^2 (R^2 = 0,25)$$

$$PMP = 21,53 + 0,29 * x - 0,13 * x^2 (R^2 = 0,37)$$

Siendo x el código ordinal de clase textural: 1 = arcilloso; 2 = arcillo limoso; 3 = franco arcillo limoso; 4 = arcillo arenoso; 5 = franco arcilloso; 6 = limoso; 7 = franco limoso; 8 = franco arcillo arenoso; 9 = franco; 10 = franco arenoso; 11 = areno franco; 12 = arenoso.

Los modelos desarrollados presentaron un ajuste estadísticamente significativo, y tienen la practicidad de sólo necesitar datos de campo, fácilmente obtenibles.

Palabras clave: Capacidad de campo, Punto de marchitez permanente, Textura, Andisol

WALTER HOLDING CAPACITY OF VOLCANIC SOILS ESTIMATED BY EASILY MEASURED VARIABLES

ABSTRACT

Soils in Patagonian Andean Region are developed mainly from volcanic ashes and they have distinct properties. We aimed to develop models in order to estimate Field capacity (FC) and Permanent Wilting Point (PWP) in volcanic soils, using easily measured variables: soil textural class and Fieldes test, which allows detecting non-crystalline aluminosilicates. Data were analyzed with second order regression models, considering textural class as ordinal independent variable (x) and FC and PWP as dependent variables. The following regression models were developed:

For soils with negative Fieldes test (i.e., without non-crystalline aluminosilicates) ($N = 132$):

$$FC = 47,18 - 4,09 * x + 0,13 * x^2 (R^2 = 0,52)$$

$$PWP = 30,46 - 3,52 * x + 0,13 * x^2 (R^2 = 0,53)$$

For soils with positive Fieldes test (i.e., with non-crystalline aluminosilicates) ($N = 211$):

$$FC = 35,50 + 1,26 * x - 0,23 * x^2 (R^2 = 0,25)$$

$$PWP = 21,53 + 0,29 * x - 0,13 * x^2 (R^2 = 0,37)$$

x = code for textural class: 1 = clay; 2 = silty clay; 3 = silty clay loam; 4 = sandy clay; 5 = clay loam; 6 = silt; 7 = silt loam; 8 = sandy clay loam; 9 = loam; 10 = sandy loam; 11 = loamy sand; 12 = sand.

These models showed significant fit, and are a useful tool based on readily available field data.

Key words: Field capacity, Permanent Wilting Point, Texture, Andisol

1 Centro de Estudios Ambientales Integrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

2 CONICET

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

* Autor de contacto: ludmilalm@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

El material original preponderante de los suelos de la Región Andino Patagónica son cenizas y arenas volcánicas holocénicas (Apcarian & Irisarri, 1993). El material volcánico sufre diferentes procesos pedogenéticos en función de las precipitaciones y la posición en el paisaje (Parfitt *et al.*, 1984). Así, el gradiente de precipitación característico de la región (Barros *et al.*, 1979) se asocia con un gradiente edáfico. El sector de mayores precipitaciones, hacia el oeste, se caracteriza por la presencia de aluminosilicatos no cristalinos (alófano e imogolita) y es dominado por Andisoles. Hacia el este, en el sector húmedo-subhúmedo, los suelos son menos lixiviados y constituyen un área transicional de Andisoles a Molisoles de régimen xérico (Etchevehere, 1972; López, 1996). La formación de haloisita, arcilla cristalina del tipo 1:1, se ve favorecida en estos ambientes más secos (Shoji *et al.*, 1993; McDaniel *et al.*, 2012).

Dado que las lluvias se concentran en el otoño-invierno, fuera del período de crecimiento de las plantas, la capacidad de los suelos volcánicos para cargarse de agua durante la época de lluvia (mayo - noviembre) y liberarla paulatinamente durante el verano, es la que permite que se desarrolle el bosque andino patagónico (Colmet Dâage *et al.*, 1998) y, a su vez, favorece una alta aptitud forestal para coníferas de rápido crecimiento (Irisarri & Mendía, 1997). La capacidad de retención de agua del suelo es considerada clave en la estimación de la aptitud forestal, tanto de acuerdo a estudios desarrollados en otras partes del mundo (Fralish, 1994; McLeod & Running, 1988; Uzoh, 2001) como en la Región Andino Patagónica (Broquen *et al.*, 1998; Loguercio *et al.*, 2015). La retención de agua está influenciada a su vez por distintas variables del suelo, entre ellas, la textura (Ahuja *et al.*, 1985; Gijsman *et al.*, 2002; Saxton & Rawls, 2006) y la presencia de aluminosilicatos no cristalinos (Warkentin & Maeda, 1980; Wada, 1985; Parfitt *et al.*, 1984).

Dado que no siempre se dispone del equipamiento para determinar en laboratorio las constantes hídricas, se han generado ecuaciones para su estimación en función de otros parámetros del suelo, como la textura. La mayoría de estos estu-

dios fueron realizados en suelos de otras partes del mundo, principalmente en Estados Unidos (Ahuja *et al.*, 1985; Gijsman *et al.*, 2002; Saxton & Rawls, 2006). En la Región Andino Patagónica, la textura al tacto fue utilizada como estimador de la humedad retenida a 15 atm, según si era mayor o menor a 15%, límite utilizado para clasificar los Andisoles údicos a nivel de suborden (Frugoni, 2004). Para suelos de la región, también se han obtenido ecuaciones que permiten estimar las constantes hídricas a partir del contenido de carbono orgánico y la densidad aparente (Gaitán & López, 2007).

El presente trabajo tuvo por objetivo estimar las constantes hídricas [capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)] en suelos volcánicos de la Región Andino Patagónica, en función de variables de fácil determinación a campo: clase textural estimada al tacto y test de fluoruro de sodio (NaF).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se centró en la Región Andino Patagónica, desde la provincia de Neuquén a la provincia de Chubut, abarcando un rango latitudinal de 38°46' S a 43°38' S, un rango longitudinal de 70°46' a 71°40' O, y un gradiente de precipitación de 400 a 2000 mm anuales. Es un área de suelos de origen volcánico, correspondientes a los órdenes Andisoles y Molisoles.

Se analizaron 343 muestras de suelo superficiales y subsuperficiales, incluyendo un abanico de profundidades y horizontes. Así, las muestras superficiales incluyeron muestras tomadas de 0-20cm y muestras de horizontes A, mientras que las muestras subsuperficiales incluyeron muestras tomadas a profundidades de 20-40cm y 60-80cm, y muestras de horizontes AC, Bw y C.

En el campo se estimó la presencia o no de aluminosilicatos no cristalinos (alófano e imogolita) mediante el test de Fieldes o test de fluoruro de sodio (NaF) (Fieldes & Perrot, 1966). Este test consiste en colocar una porción de suelo sobre un papel de filtro embebido en fenolftaleína y agregar una solución acuosa de NaF 1N. Los aluminosilicatos no cristalinos son fácilmente disueltos por el

NaF, y por combinación del flúor y de la alúmina se liberan bases que colorean de violeta el papel.

La textura al tacto fue determinada siguiendo un procedimiento similar al detallado en la **Figura 1**. Cuando las muestras presentaron alto contenido de fracción gruesa, fueron tamizadas por malla de 2 mm a fin de que la fracción gruesa no enmascare la textura de la fracción tierra fina.

Todas las muestras fueron llevadas al laboratorio, secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm. La capacidad de campo (CC, agua retenida a 0,3 atm) y el punto de marchitez permanente (PMP, agua retenida a 15 atm) fueron determinados por olla y membrana de presión (Richards, 1956). Las muestras, tamizadas y saturadas de agua, fueron colocadas en las ollas a presión constante y, una vez alcanzado el equilibrio, cuando cesó la eliminación de agua, se determinó su contenido de humedad. Este proceso demoró

hasta siete días, según las características de las muestras.

Los datos se analizaron separadamente de acuerdo a la respuesta positiva o negativa al test de Fieldes, es decir, a la presencia o no de aluminosilicatos no cristalinos. Se ajustaron modelos de regresión, considerando la clase textural como variable ordinal independiente y las constantes hídricas como variables dependientes. Para el ordenamiento de la clase textural se consideraron los valores medios de CC para cada clase textural, de acuerdo al modelo propuesto por Saxton & Rawls (2006). El análisis de los datos fue realizado mediante el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Once de las doce clases texturales estuvieron representadas en las 343 muestras incluidas en

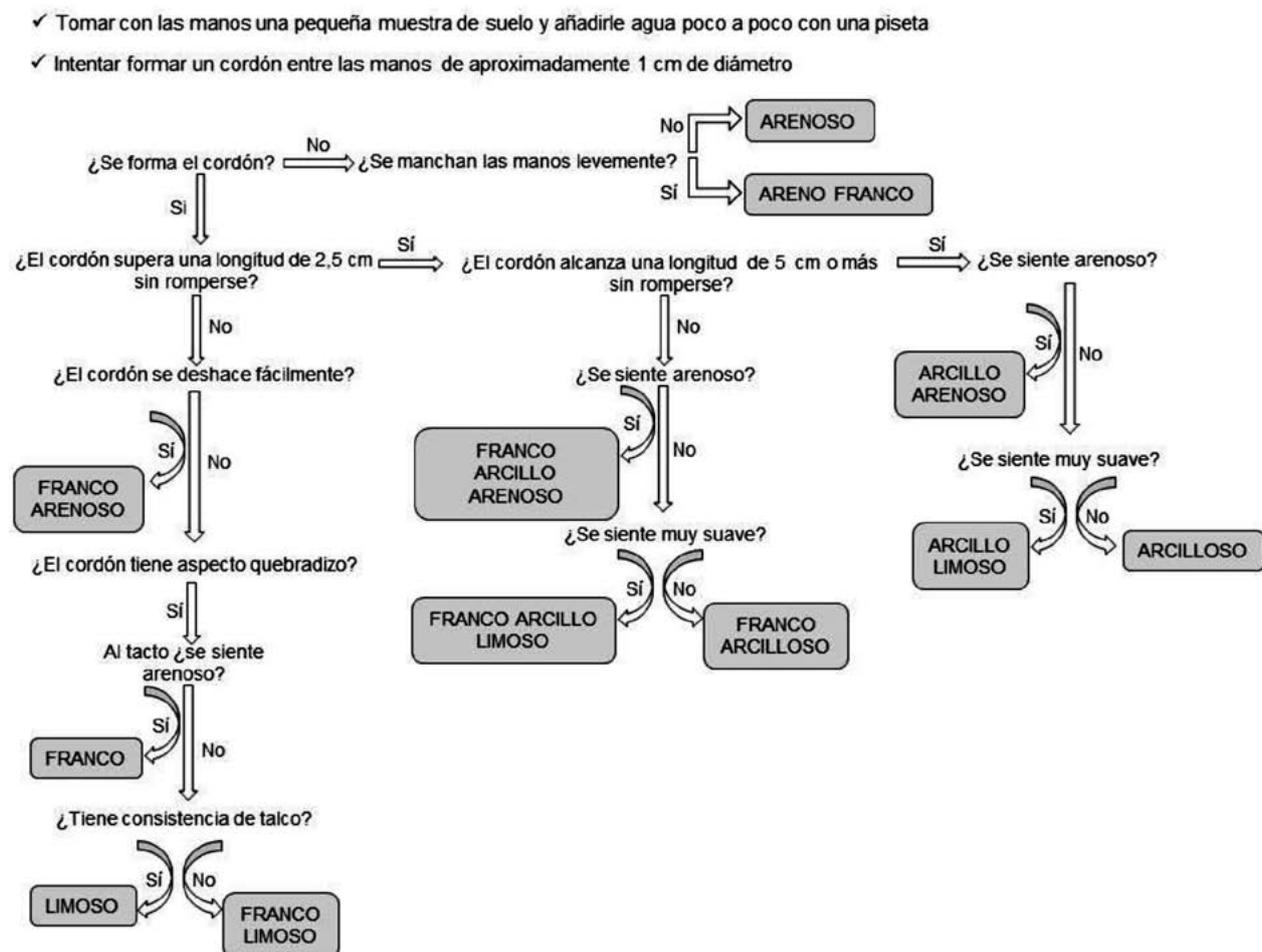


Figura 1. Clave para determinar las clases texturales a campo. Modificado de Thien (1979).

Figure 1. Key for determining field textural classes. Modified from Thien (1979).

este estudio. Sin embargo, el número de muestras fue muy diferente para cada textura. La mayoría de las muestras presentaron texturas francas a arenosas (Franca, Franco limosa, Franco arenosa, Areno franca, Arenosa), las cuales resultaron dominantes en la región de estudio.

A partir de las texturas determinadas a campo se pudieron ajustar modelos para la determinación de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, para muestras de suelo con reacción al NaF negativa (**Figura 2a**) y positiva (**Figura 2b**). Los modelos que mejor ajustaron en todos los casos fueron polinomios de segundo orden, detallados en la **Tabla 1**. Estos modelos cuadráticos presentaron un buen ajuste (test de bondad de ajuste: $p > 0,05$). En la **Tabla 1** se detallan los valores observados y los valores predichos de CC y PMP para las distintas clases texturales y reacción al NaF.

En coincidencia con otros estudios, las texturas más finas se asociaron con valores más altos de las constantes hídricas (**Figura 2**).

En la **Tabla 1** se muestran también los intervalos de confianza y de predicción. El intervalo de confianza indica los valores esperados de las constantes hídricas (y) para un valor dado de clase textural (x), con una probabilidad del 95%. El intervalo de predicción, en tanto, indica el rango de valores posibles que se pueden obtener en una determinación futura de y , dado un valor de x . Los amplios intervalos de predicción registrados en todos los casos, evidencian que el poder predictivo de estos modelos es bajo. Otras variables, diferentes a la textura, pueden estar fuertemente asociadas a la capacidad de retención de agua. Gaitán & López (2007), en suelos volcánicos de la región andino patagónica, hallaron modelos de regresión que permiten estimar la CC y el PMP a

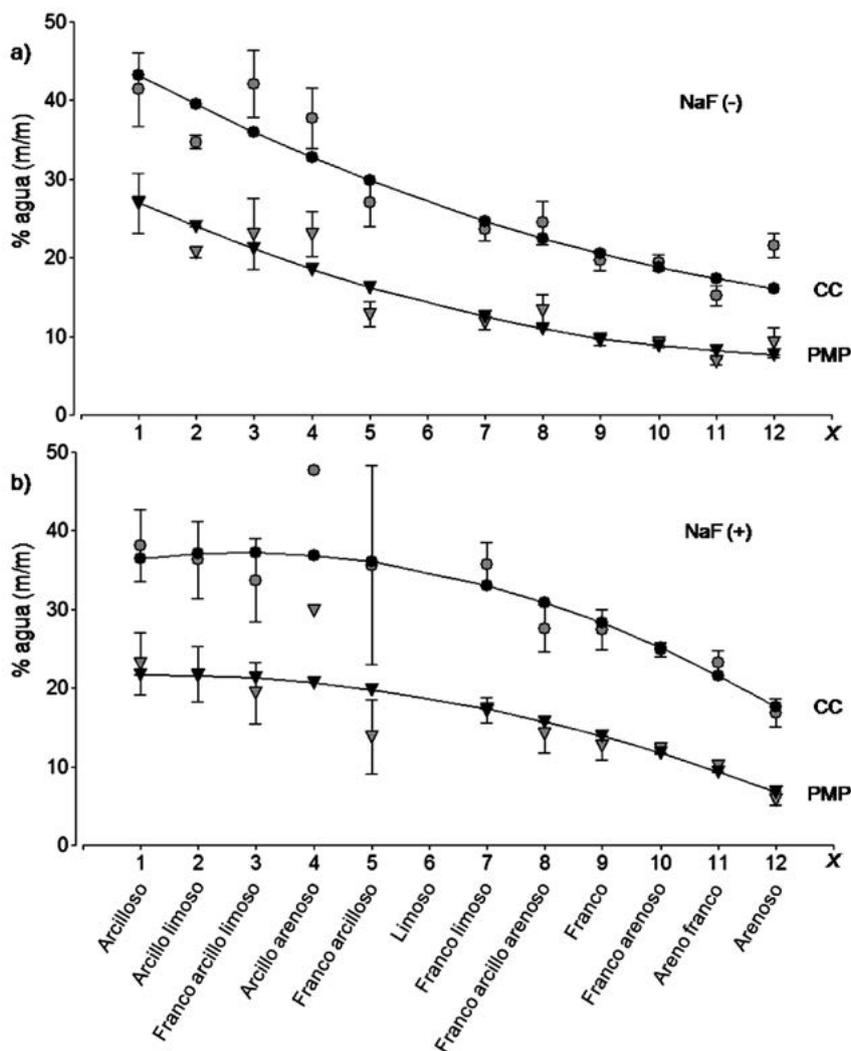


Figura 2. Modelos de regresión para la estimación de capacidad de campo (círculos) y punto de marchitez permanente (triángulos) en función de la clase textural (x) para suelos con reacción al NaF negativa (**Figura a**) y positiva (**Figura b**). Los símbolos y curvas negras corresponden al modelo ajustado. Los símbolos grises corresponden al valor medio observado ± 1 error estándar.

Figure 2. Regression models for estimating field capacity (circles) and permanent wilting point (triangles) in volcanic soils by the textural class (x), for soils with negative reaction to NaF (**Figure a**) and positive reaction to NaF (**Figure b**). Black symbols and curves correspond to the adjusted models. Gray symbols correspond to mean observed value ± 1 standard error.

Tabla 1. Modelos de regresión para estimar capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelos volcánicos, en función de la clase textural y el test de NaF. Se indican el número de muestras (N), los valores observados y predichos y los Intervalos de Confianza y Predicción.

Table 1. Regression models for estimating field capacity and permanent wilting point in volcanic soils, by the textural class and NaF test. Number of samples (N), observed and predicted values, confidence and prediction intervals are shown.

Reacción al NaF negativa										
		Capacidad de campo (%)				Punto de marchitez permanente (%)				
		CC = 47,18 - 4,09 * x + 0,13 * x ² (R ² =0,52)				PMP=30,46 - 3,52 * x + 0,13 * x ² (R ² =0,53)				
Clase Textural	x	N	Valor observado	Valor Predicho	Intervalo de Confianza	Intervalo de Predicción	Valor observado	Valor Predicho	Intervalo de Confianza	Intervalo de Predicción
Arcilloso	1	8	41,4 ± 4,7	43,2	39,0-47,4	33,4-53,0	26,9 ± 3,9	27,1	24,1 - 30,1	20,2-34,0
Arcillo limoso	2	3	34,7 ± 0,8	39,5	36,4-42,6	29,9-49,1	20,6 ± 0,6	24	21,8-26,2	17,2-30,7
Franco arcillo limoso	3	6	42,1 ± 4,3	36	33,5-38,6	26,5-45,6	23,0 ± 4,6	21,1	19,3 - 22,9	14,4-27,8
Arcillo arenoso	4	4	37,7 ± 3,8	32,8	30,4-35,2	26,3-42,3	23,0 ± 2,9	18,6	16,9-20,2	11,9-25,3
Franco arcilloso	5	4	27,0 ± 2,9	29,9	27,5-32,2	20,3-39,4	12,8 ± 1,6	16,3	14,6-17,9	9,5-23,0
Limoso	6	-	-	27,3	-	-	-	14,2	-	-
Franco limoso	7	18	23,6 ± 1,3	24,7	22,5-26,9	15,2-34,2	11,8 ± 1,0	12,5	10,9-14,0	5,8-19,1
Franco arcillo arenoso	8	3	24,4 ± 2,7	22,5	20,6-24,3	13,0-31,9	13,3 ± 2,0	11	9,6-12,3	4,3-17,6
Franco	9	23	19,6 ± 1,3	20,5	19,0-22,0	11,1-29,9	9,4 ± 0,7	9,7	8,7-10,8	3,1-16,4
Franco arenoso	10	47	19,4 ± 1,1	18,8	17,3-20,3	9,3-28,2	9,2 ± 0,7	8,8	7,7-9,8	2,2-15,4
Areno franco	11	13	15,2 ± 1,3	17,3	15,0-19,6	7,8-26,8	6,8 ± 0,4	8,1	6,4-9,7	1,4-14,8
Arenoso	12	3	21,5 ± 1,5	16,1	12,4-19,8	6,4-25,8	9,2 ± 2,0	7,7	5,0-10,3	0,8-14,5

Reacción al NaF positiva										
		Capacidad de campo (%)				Punto de marchitez permanente (%)				
		CC=35,50 + 1,26*x - 0,23 * x ² (R ² =0,25)				PMP=21,53 + 0,29 * x - 0,13 * x ² (R ² =0,37)				
Clase Textural	x	N	Valor observado	Valor Predicho	Intervalo de Confianza	Intervalo de Predicción	Valor observado	Valor Predicho	Intervalo de Confianza	Intervalo de Predicción
Arcilloso	1	6	38,12 ± 4,6	36,5	38,8-42,3	23,6-49,4	23,0 ± 4,0	21,7	18,5-24,9	14,5-28,9
Arcillo limoso	2	4	36,3 ± 5,0	37,1	32,7-41,6	24,4-49,8	21,8 ± 3,5	21,6	19,1 - 24,1	14,6-28,6
Franco arcillo limoso	3	6	33,7 ± 5,3	37,2	33,6-40,8	24,7-49,8	19,4 ± 3,9	21,3	19,3 - 23,3	14,3-28,2
Arcillo arenoso	4	1	47,8	36,9	33,7-40,1	24,4-49,4	29,9	20,7	18,9 - 22,4	13,7-27,6
Franco arcilloso	5	2	35,6 ± 12,7	36,1	33,1-39,1	23,6-48,6	13,8 ± 4,7	19,8	18,1-21,5	12,9-26,7
Limoso	6	-	-	34,8	-	-	-	18,7	-	-
Franco limoso	7	10	35,7 ± 2,9	33,1	30,3-35,8	20,6-45,6	17,1 ± 1,6	17,3	15,8-18,9	10,5-24,2
Franco arcillo arenoso	8	5	27,6 ± 3,0	30,9	28,5-33,3	18,5-43,3	14,1 ± 2,4	15,7	14,3-17,1	8,8-22,6
Franco	9	17	27,4 ± 2,6	28,3	26,3-30,2	15,9-40,7	12,7 ± 1,8	13,8	12,7-14,9	6,9-20,7
Franco arenoso	10	84	24,9 ± 1,0	25,2	23,7-26,6	12,8-37,5	12,2 ± 0,6	11,7	10,8-12,5	4,8-18,6
Areno franco	11	38	23,2 ± 1,5	21,6	20,1-23,1	9,2-34,0	10,0 ± 0,7	9,3	8,4-10,2	2,4-16,2
Arenoso	12	38	16,8 ± 1,8	17,6	15,0-20,1	5,1-30,0	5,8 ± 0,7	6,7	5,3 - 8,1	1,0-13,8

Los valores de CC y PMP están expresados en % masa/masa. Field capacity and permanent wilting point are expressed as mass percentage.

partir de la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico, con buenos ajustes y valores de R² entre 0,45 y 0,77.

Los modelos desarrollados presentaron un mejor ajuste, con mayores valores de R², para aquellas muestras cuya reacción al NaF fue negativa, es decir, sin presencia de aluminosilicatos no cristalinos (**Tabla 1**). Este resultado puede estar relacionado con la dificultad para determinar la verdadera textura del suelo ante la presencia de arcillas no cristalinas. En estos suelos se forman microagregados, como consecuencia de la fuerte cementación entre la materia orgánica y la fracción mineral (Warkentin & Maeda, 1980; Wada, 1985; McDaniel *et al.*, 2012). Estos microagregados se comportan como una partícula más

gruesa que enmascara la granulometría verdadera del suelo, y dificulta la determinación de la clase textural. En este sentido, la subjetividad del evaluador en la determinación de la textura al tacto a campo constituye una posible fuente de error, y explica en parte la alta dispersión de los datos (**Figura 2**).

Los suelos volcánicos tienen características distintivas, una de las cuales es la gran capacidad de almacenar agua (McDaniel *et al.*, 2012). Así, los valores esperados de agua útil (i.e., diferencia entre CC y PMP) resultaron mayores en los modelos basados en datos del área de estudio que los desarrollados para suelos en general por Saxton & Rawls (2006), para la mayoría de las clases texturales (**Figura 3**). La mayor diferencia se observa

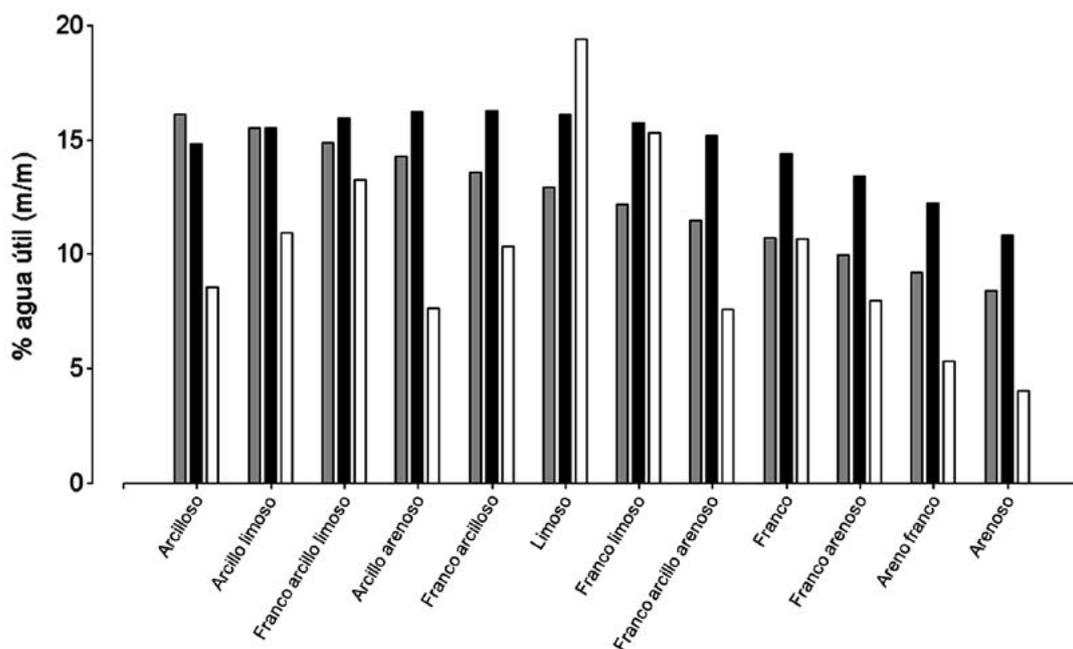


Figura 3. Valores estimados de agua útil en función de la clase textural, según distintos modelos estadísticos: modelos generados con datos de la Región Andino Patagónica para suelos con reacción al NaF negativa ■ y positiva ■ y según el modelo general desarrollado por Saxton & Rawls (2006), considerando un contenido de materia orgánica de 5% □.

Figure 3. Estimated values of useful water according to the textural class, according to different statistical models: models generated with data from the Patagonian Andean Region for soils with negative reaction to NaF ■ and positive ■ and according to the general model developed by Saxton & Rawls (2006), considering an organic matter content of 5% □.

en las texturas más gruesas. Las características particulares de los suelos de la Región Andino Patagónica ameritan el ajuste de este tipo de variables con modelos específicos para la zona.

En la **Figura 3** se evidencia también que la diferencia en la capacidad de retención de agua entre suelos con y sin aluminosilicatos no cristalinos (barras negras y grises) es mayor para texturas medias y gruesas, y mínima en las clases texturales ricas en arcilla.

Los modelos desarrollados tienen la practicidad de sólo necesitar datos de campo, fácilmente obtenibles, cumpliendo así el objetivo propuesto en este estudio. Futuros trabajos deberían precisar estos modelos con variables analíticas determinadas en laboratorio, que pueden afectar la capacidad de retención de agua, por ejemplo, la discriminación de las distintas fracciones granulométricas (i.e., porcentaje de arcilla, limo y arena) y el contenido de materia orgánica (Saxton *et al.*, 1986; Rawls *et al.*, 2003; Gaitán & López 2007).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jorge Irisarri por su guía en los estudios de campo que fueron la base para generar este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, LR; JW Naney & RD Williams. 1985. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1100–1105.
- Apcarian, A & J Irisarri. 1993. Caracterización mineralógica de suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas en las provincias de Neuquén y Río Negro (R.A.). *Actas II Jornadas de Vulcanología, Medio ambiente y Defensa Civil.* Zapala, Neuquén. 23 p.
- Barros, V; B Scian & H Mattio. 1979. Campos de precipitación de la Provincia de Chubut (período 1931 - 1960). *Geoacta* 10: 175 – 192.
- Broquen, P; JL Girardin; G Falbo & O Alvarez. 1998. Modelos predictores de índice de sitio en *Pinus ponderosa* Dougl. en base a características del suelo andinopatagónico oriental, 37°-41° S, República Argentina. *BOSQUE* 19(1): 71-79.

- Colmet Daage, F; A Marcolin; C López; M Lanciotti; J Ayesa; D Bran; E Andenmatten; P Broquen; J Girardin; G Cortés; J Irisarri; E Besoain; A Sadzawka; G Sepúlveda; S Massaro; G Millot & P Bouleau. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. Convenio INTA – ORSTOM. S. C. de Bariloche, Río Negro.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2013 InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Etchevehere, P. 1972. Los suelos de la Región Andino-Patagónica. En: Dimitri, M. (Ed.). La Región de los bosques Andino-Patagónicos, Sinopsis general. Colección Científica del INTA, Buenos Aires. p. 83-95.
- Fieldes, MP & KW Perrot. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *N Z J Sci* 9:623–629.
- Fralish, JS. 1994. The Effect of Site Environment on Forest Productivity in the Illinois Shawnee Hills. *Ecological Applications*, 4: 134–143.
- Frugoni, MC. 2004. Estimación del contenido de humedad basada en las texturas descriptas a campo en Andisoles bajo régimen údico (Norpatagonia, Argentina). *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. Formato digital*.
- Gaitán, JJ & CR López. 2007. Análisis del gradiente edáfico en la región andinopatagónica. *Ciencia del Suelo* 25(1): 53-63.
- Gijsman, AJ; SS Jagtap & JW Jones. 2002. Wading through a swamp of complete confusion: How to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *Eur. J. Agron.* 18:75–105.
- Irisarri, J & J Mendía. 1997. Relaciones suelo-paisaje en la evaluación de la potencialidad forestal de la región central andino—patagónica, Argentina. *Bosque* 18:21–30.
- Loguercio, G; L La Manna; H Gonda; D Mohr Bell; L Heitzmann & C Frugoni. 2015. Herramientas para zonificar la calidad de sitio de pino ponderosa y sitios especiales para especies forestales de alto valor maderable en Neuquén. En: *Investigación Forestal 2011-2015. Los Proyectos de Investigación Aplicada. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires, Argentina.* p. 42-45.
- López, CR. 1996. La carta de suelos en apoyo a la evaluación del potencial forestal de las tierras de la región andina patagónica norte. En: Moscatelli, G; J Panigatti & R Di Giacomo. (Eds.). *Utilización de la cartografía para el uso sustentable de las tierras. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires.* p. 78-91.
- McDaniel, PA; DJ Lowe; O Arnalds & CL Ping. 2012. Andisols. In: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) *Handbook of soil sciences, vol 1, 2nd edn., Properties and processes* CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL, pp 29–48.
- McLeod, SD & SW Running. 1988. Comparing site quality indices and productivity in ponderosa pine stands of western Montana. *Canadian Journal of Forest Research* 18:346-352.
- Parfitt, RL; M Saigusa & JD Cowie. 1984. Allophane and halloysite formation in a volcanic ash bed under different moisture conditions. *Soil Science* 138:360-364.
- Rawls, WJ; YA Pachepsky; JC Ritchie; TM Sobecki & H Bloodworth. 2003. Effect of Soil Organic Carbon on Soil Water Retention. *Geoderma* 116:61–76.
- Richards, L. 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Sci Soc Am Proc* 20: 301-303.
- Saxton, KE & WJ Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569–1578.
- Saxton, KE; WJ Rawls; JS Romberger & RI Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Trans. ASAE* 50:1031–1035.
- Shoji, S; M Nanzyo & RA Dahlgren. 1993. *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization.* Elsevier, Amsterdam.
- Thien, S. 1979. A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis, *J. Agron. Educ.*, 8, 54–55.
- Uzoh, FCC. 2001. A height increment equation for young ponderosa pine plantations using precipitation and soil factors. *Forest Ecology and Management* 142: 193-203.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andosols. *Adv Soil S* 2:173–229.
- Warkentin, BP & T Maeda. 1980. Physical and mechanical characteristics of Andisols. In: Theng BK (ed) *Soil with variable charge.* New Zealand Society of Soil Science, pp 281–301.