



Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

Escuela para Graduados

**EVALUACIÓN DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA LA
ESTIMACIÓN DE CONSTANTES HÍDRICAS EN TRES SUELOS DEL CENTRO
DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA.**

Matías Mastromauro

**Trabajo Final para optar al grado académico de Especialista en Producción de
Cultivos Extensivos.**

Córdoba, 2014.

**EVALUACIÓN DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA LA
ESTIMACIÓN DE CONSTANTES HÍDRICAS EN TRES SUELOS DEL CENTRO
DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA.**

Matías Mastromauro

Tutor: Ing. Agr. (Dr.) Omar Bachmeier

Co-Tutora: Ing. Agr. (M.Sc.) Cecilia Vettorello

Aprobado y corregido de acuerdo a las sugerencias del Tribunal Evaluador.

Ing. Civil (Dr.) Erik Daniel Zimmermann

Ing. Agr. (M.Sc.) Juan Pablo Giubergia

Ing. Agr. (Esp.) Adriana Ana del Carmen Rollán

Presentación Formal Académica.

22 de Agosto de 2014

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en forma especial tanto a mi tutor del trabajo final Ing. Agr. (Dr.) Omar Bachmeier, como a mi co-tutora Ing. Agr. (M.Sc.) Cecilia Vettorello. Ambos contribuyeron fuertemente con su aporte de conocimiento para guiarme en este proceso de aprendizaje, dedicándome el tiempo necesario, siendo de gran importancia para la ejecución de este trabajo.

Por otra parte, quiero agradecer también la contribución especial del Ing. Agr. (M.Sc.) Francisco Damiano, de la Ing. Agr. (Dra.) Mónica Balzarini, del Geólogo (Dr.) Ricardo Astini y del Geólogo (Dr.) Eduardo Zamora. Todos ellos participaron activamente y de manera muy cordial, aportando desde sus especialidades conocimientos muy relevantes para el desarrollo de este trabajo.

Por último, quiero agradecer a todo el cuerpo docente de la Especialización en Producción de Cultivos Extensivos (FCA-UNC e INTA), los cuales formaron parte de este proceso de aprendizaje y, sin duda, han contribuido a mi desarrollo y formación profesional.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE SIGLAS O ABREVIATURAS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Condiciones experimentales.....	5
Funciones de pedotransferencia	8
Análisis estadísticos	11
RESULTADOS	12
Validación y selección de modelos de pedotransferencia.....	12
Estudio de los predictores de la retención hídrica a -1500 kPa y a -33 kPa.....	17
DISCUSIÓN	21
CONCLUSIONES	25
CONSIDERACIÓN FINAL	26
BIBLIOGRAFÍA	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físico-químicas de los perfiles analizados, correspondientes a tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.	9
Tabla 2. Parámetros intervinientes en las funciones de estimación de retención hídrica para cada uno de los modelos considerados.	10
Tabla 3. Error medio (EM), raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECOMP), coeficiente de determinación de la regresión lineal (r^2) y orden de mérito de los modelos analizados en función de RECOMP y r^2 , para el potencial mátrico de -1500 kPa, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.	13
Tabla 4. Error medio (EM), raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECOMP), coeficiente de determinación de la regresión lineal (r^2) y orden de mérito de los modelos analizados en función de RECOMP y r^2 , para el potencial mátrico de -33 kPa, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista del campo en estudio con detalle de cotas de elevación, ubicado en las cercanías de la localidad de Río Segundo, Córdoba, Argentina (31°36'55"S-63°59'2"O)...5	5
Figura 2. Ubicación de los puntos de ejecución de calicatas para la descripción taxonómica y muestreo de los suelos bajo estudio, ubicados en el área central de la provincia de Córdoba, Argentina (31°36'55"S-63°59'2"O).7	7
Figura 3. Relación entre el contenido de agua volumétrico a -1500 kPa medido en laboratorio vs. contenido de agua volumétrico a -1500 kPa estimado por los diferentes modelos, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina. 15	15
Figura 4. Relación entre contenido de agua volumétrico a -33 kPa medido en laboratorio vs. contenido de agua volumétrico a -33 kPa estimado por los diferentes modelos, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina. 16	16
Figura 5. Gráficos de residuos parciales para el conjunto tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, que relacionan agua volumétrica retenida a -1500 kPa respecto a % de limo (a), capacidad de intercambio catiónico (b) y actividad de arcilla (c). 18	18
Figura 6. Gráficos de residuos parciales para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, que relacionan agua volumétrica retenida a -33 kPa respecto a % de arena (a), actividad de arcilla (b) y densidad aparente (c). 19	19
Figura 7. Gráfico de dispersión de la regresión lineal entre el contenido volumétrico a -1500 kPa y el contenido porcentual de arena, para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba.20	20
Figura 8. Gráfico de dispersión de la regresión lineal entre el contenido volumétrico a -33 kPa y el contenido porcentual de arena, para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba.21	21

ÍNDICE DE SIGLAS O ABREVIATURAS

AA: actividad de arcilla

Arc: arcilla

Are: arena

CAD: capacidad de agua disponible

CC: capacidad de campo (agua retenida a -33 kPa).

CIC: capacidad de intercambio catiónico

CO: carbono orgánico

EM: error medio

FPT: función de pedotransferencia

Li: limo

LiF: limo fino

MO: materia orgánica

PMP: punto de marchitez permanente (agua retenida a -1500 kPa)

RECMP: raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción

RHe: retención hídrica estimada

RHo: retención hídrica observada

θ : contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

ρ_a : densidad aparente

Ψ : potencial mátrico

RESUMEN

El cálculo de la capacidad de agua disponible (CAD) de los suelos requiere el conocimiento previo de la retención hídrica (RH) entre dos valores de potencial mátrico. La determinación de estos parámetros es costosa en tiempo y recursos. Para enfrentar esta problemática, se han desarrollado ecuaciones que relacionan variables del suelo con el contenido de agua volumétrico a potenciales hídricos seleccionados, las cuales se denominan funciones de pedotransferencia (FPT). Los objetivos del presente trabajo fueron: *i*) estudiar distintas FPT y validar las de mejor ajuste en la estimación de la CAD de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, los cuales presentan variabilidad en su morfología, composición y posición topográfica; y *ii*) determinar las variables de mayor impacto en la estimación de la RH a través de FPT para el conjunto de tres suelos en estudio. La experimentación se llevó a cabo en julio de 2013, en un lote ubicado en las cercanías de Río Segundo, provincia de Córdoba (31°36'55"S-63°59'2"O). Se evaluaron 8 modelos desarrollados en zonas templadas. Los resultados permiten concluir que de los modelos estudiados para la estimación de los valores de RH a -1500 kPa, ninguno alcanzó una performance suficientemente aceptable para ser adoptado en condiciones de campo. La precisión obtenida en la estimación de los valores de RH a -33 kPa fue aceptable en 5 de los 8 modelos estudiados. Las componentes granulométricas resultaron determinantes en la estimación de la RH, tanto a -1500 kPa como a -33 kPa. Por otro lado, el hecho de tratar conjuntamente suelos de diferente clase textural a través de FPT, limita la precisión en la predicción por parte de dichos modelos, más aún cuando el desarrollo de las funciones no ha sido en la zona de los perfiles que se desean estudiar y el número de observaciones es bajo.

Palabras clave: capacidad de agua disponible, retención hídrica, funciones de pedotransferencia.

ABSTRACT

Calculation of the available water capacity (AWC) of soils requires prior knowledge of water retention (WR) between two values of soil water matric potential. The determination of these parameters is neither time nor resource efficient. To confront this problem, equations that relate variables of soil with volumetric water content at selected water potentials have been developed. These equations are called pedotransfer functions (PTF). The objectives of this study were: *i*) to study different PTF and validate those of best fit in the estimation of AWC of three soils from the center of the province of Córdoba, which show variability in their morphology, physical and chemical composition and topographic position; and *ii*) to determine the variables with more impact on the estimation of WR through PTF for the group of three soils under study. The experiment was conducted in July, 2013, on a field located near Río Segundo, province of Córdoba (31°36'55"S-63°59'2"W). Eight models developed in temperate areas were assessed. Results show that none of the models studied to estimate the values of WR at -1500 kPa, reached a sufficiently acceptable performance to be adopted under field conditions. The accuracy obtained in the estimation of values of WR at -33 kPa was acceptable in 5 out of 8 models studied. The granulometric components were decisive in the estimation of WR, both at -1500 kPa as in -33 kPa. On the other hand, the fact of jointly dealing with soils of different textural class through PTF, limits the accuracy in prediction by these models, especially when the development of functions has not been in the same zone of profiles that wish to be studied and the number of observations is low.

Keywords: available water capacity, water retention, pedotransfer functions.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de producción de cultivos extensivos que experimenta la provincia de Córdoba, inserto en una situación de creciente demanda mundial de alimentos, toma vital importancia el manejo eficiente de los recursos disponibles, en especial en lo que se refiere al factor tierra, como el elemento más limitante para incrementar la producción, puesto que la expansión agrícola hacia nuevas áreas dentro de la provincia se halla prácticamente imposibilitada.

Esta situación genera la necesidad de explotar territorios que presentan una importante heterogeneidad, en cuanto a capacidad productiva, en pequeñas escalas.

En el común de los casos, por practicidad, se suelen manejar estas unidades productivas de modo totalmente homogéneo, sin discriminar zonas de diferente aptitud productiva dentro del terreno. Esto desencadena, en numerosas ocasiones, el fracaso económico, debido a que se asignan insumos en igual cantidad y calidad a zonas del lote que no responden equitativamente en rendimiento, afectando directamente los márgenes obtenidos.

En la región central de la provincia de Córdoba, es común encontrar escenarios en los cuales se presentan situaciones como las mencionadas, en donde sectores de baja aptitud productiva colindan con otros considerablemente más aptos para el desarrollo de cultivos extensivos. Los primeros, muchas veces se presentan en sectores correspondientes a paleocauces meandriformes, en especial en relación a los ríos Suquía y Xanaes.

Ubicándose geográficamente en la provincia de Córdoba, observamos que las planicies situadas al oriente y al sur de las sierras constituyen la región geomorfológica más importante. Dentro de una aparente monotonía, existe una extensa gama de formas menores. En la evolución de las redes hidrográficas se encuentra la explicación de muchas formas del modelado (Capitanelli, 1979).

Estas estructuras de alta sinuosidad se generan producto del escurrimiento del agua desde las zonas de sierra hacia el este, ingresando a los sitios de planicie, donde el curso se va desarrollando por los puntos de mínima pendiente (Astini, com. pers.). El thalweg (línea que une los puntos de mayor profundidad en un curso de agua) dibuja una trayectoria de sección transversal asimétrica, generada por las curvas meandrosas del trazado (Zimmermann, com. pers.).

Los cordones de arena correspondientes a los cinturones de meandro se preservan rodeados por limos y arcillas de la llanura de inundación, generados por acreción vertical. Cuando el río queda confinado por tapones de arcilla se desarrolla una cresta de depósitos de relleno de canal, topográficamente más alta que la llanura de inundación que lo rodea, lo que facilita el cambio de posición del canal por avulsión¹ (Allen, 1965).

Cuando los ríos discurren por la llanura, barren lateralmente el relieve. De esta manera, el río va migrando y posicionándose en distintas coordenadas, siguiendo la pendiente regional. Este movimiento no es continuo, sino que ocurre de a saltos, permaneciendo en cada posición el tiempo suficiente para generar los depósitos arenosos típicos de estos paleocauces (Astini, com. pers.).

Estos escenarios representan, en la mayoría de los casos, superficie de reducida productividad por las características edáficas que presentan sus suelos (afectando principalmente la retención hídrica), limitante exacerbada por encontrarse en una zona semiárida, reflejado aún más en cultivos invernales como el trigo, donde la productividad de los mismos está casi completamente definida por el agua disponible a la siembra, en la mayoría de los años (Abbate y Cantarero, 2001). En suelos de texturas arenosas, cuando el rendimiento es limitado por la oferta hídrica, la variabilidad topográfica es útil para interpretar la heterogeneidad de los rendimientos. La posición en el paisaje influye en la distribución de partículas de suelo, en el contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes (Pennock y De Jong, 1990), entre otras propiedades edáficas. Otra restricción productiva que suelen presentar estos suelos tiene que ver con la profundidad del perfil, ya

¹La avulsión, en geología sedimentaria y geomorfología fluvial, es el abandono rápido de un cauce de un río y la formación de uno nuevo (Slingerland y Smith, 1998).

que es común que presenten endurecimientos (duripanes, horizontes o capas duras, tanto en seco como en húmedo) entre 50 y 70 cm de profundidad, lo que dificulta la expansión radical, afectando nuevamente la capacidad de agua disponible de los suelos (CAD) y, por consiguiente, el rendimiento potencial de los cultivos (Arshad et al., 1996; Dardanelli et al., 1997; Puricelli et al., 1997).

La CAD representa un factor clave en la producción de cultivos agrícolas, más aún en el contexto de los actuales escenarios de producción, para lo cual se requiere conocer la marcha y evolución de indicadores edáficos sobre uso y manejo del suelo en forma sustentable (Viglizzo et al., 2004). Este aspecto cobra mayor relevancia en este tipo de suelos, donde la disponibilidad hídrica es muy limitada. Esta situación, genera la necesidad de explorar herramientas tendientes a lograr un conocimiento acabado de la CAD de dichos perfiles.

En la actualidad, la provincia de Córdoba no dispone de una base de datos estandarizada confiable publicada por organismos oficiales (i.e. Universidades, INTA y Estado Provincial) en la que se presente información relacionada a las características hídricas de los suelos del territorio provincial, específicamente en relación a las constantes hídricas, que son parámetros indispensables en la determinación de su capacidad de agua disponible (CAD). Disponer de valores de CAD a nivel de cartas de suelo o de herramientas informáticas representaría un instrumento de gran utilidad para productores y técnicos, lo que justifica ampliamente el desarrollo de metodologías conducentes a la obtención de la capacidad de retención hídrica de los suelos.

El cálculo de CAD requiere usualmente el conocimiento previo de la retención de humedad entre dos valores de potencial mátrico (i.e. -33 kPa y -1500 kPa) (Damiano y Taboada, 2000). La determinación de estos parámetros, tanto en condiciones de campo como en laboratorio, es costosa en tiempo y recursos, además de demandar un gran número de muestras debido a la variabilidad espacial del suelo (Klute, 1986; Kern, 1995; Vereecken, 1995; Gupta y Larson, 1979). Para enfrentar estas problemáticas, se han desarrollado ecuaciones que relacionan variables del suelo con el contenido de agua volumétrico a potenciales hídricos seleccionados, las cuales se denominan funciones de

pedotransferencia (FPT). Estas funciones tienen como argumento general atributos que describen al suelo (e.g. distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, materia orgánica, carbono orgánico, etc.) y generan como resultado la función de retención de agua (Kern, 1995). Las ventajas de utilizar ecuaciones analíticas en el estudio del agua del suelo incluye: simple comparación de propiedades hidráulicas de diferentes suelos y horizontes, caracterización de la variabilidad espacial de propiedades hidráulicas de los suelos, interpolación de datos faltantes, y la posibilidad de ser aplicado en modelos de flujo no saturado (van Genuchten et al., 1991). La distribución de tamaño de partículas afecta fuertemente el contenido hídrico a valores de potencial mátrico menores a -100 kPa y, en menor medida, a valores mayores de potencial mátrico, donde la estructura del suelo es también importante (Hillel, 1982). La materia orgánica del suelo afecta la retención hídrica debido a sus características hidrofílicas y su influencia en la estructura del suelo (Klute, 1986) y en la densidad aparente (Bauer y Black, 1992; Stevenson, 1974).

Además de la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo, una evaluación detallada de su variabilidad espacial puede resultar importante a los efectos de la gestión de los recursos hídricos (Liao et al., 2011), o bien del manejo puntual de cada cultivo en lo que respecta a fechas de siembra, elección de genotipos, arreglo espacial, entrega oportuna del agua de riego, etc.

En el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

- Estudiar distintas funciones de pedotransferencia y validar las de mejor ajuste en la estimación de la capacidad de retención hídrica de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, los cuales presentan variabilidad en su morfología, composición y posición topográfica.
- Determinar las variables de mayor impacto en la estimación de la retención hídrica a través de funciones de pedotransferencia para el conjunto de tres suelos en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones experimentales

Los experimentos se llevaron a cabo en una parcela ubicada a 6,5 km en dirección noroeste de la localidad de Río Segundo (provincia de Córdoba) ($31^{\circ}36'55''\text{S}$ - $63^{\circ}59'2''\text{O}$). La misma tiene una dimensión total de 83 hectáreas, las cuales se distribuyen topográficamente de modo heterogéneo, con diferencias de cota entre el punto más alto y más bajo de 15 metros, determinado a través del programa Global Mapper (Figura 1).

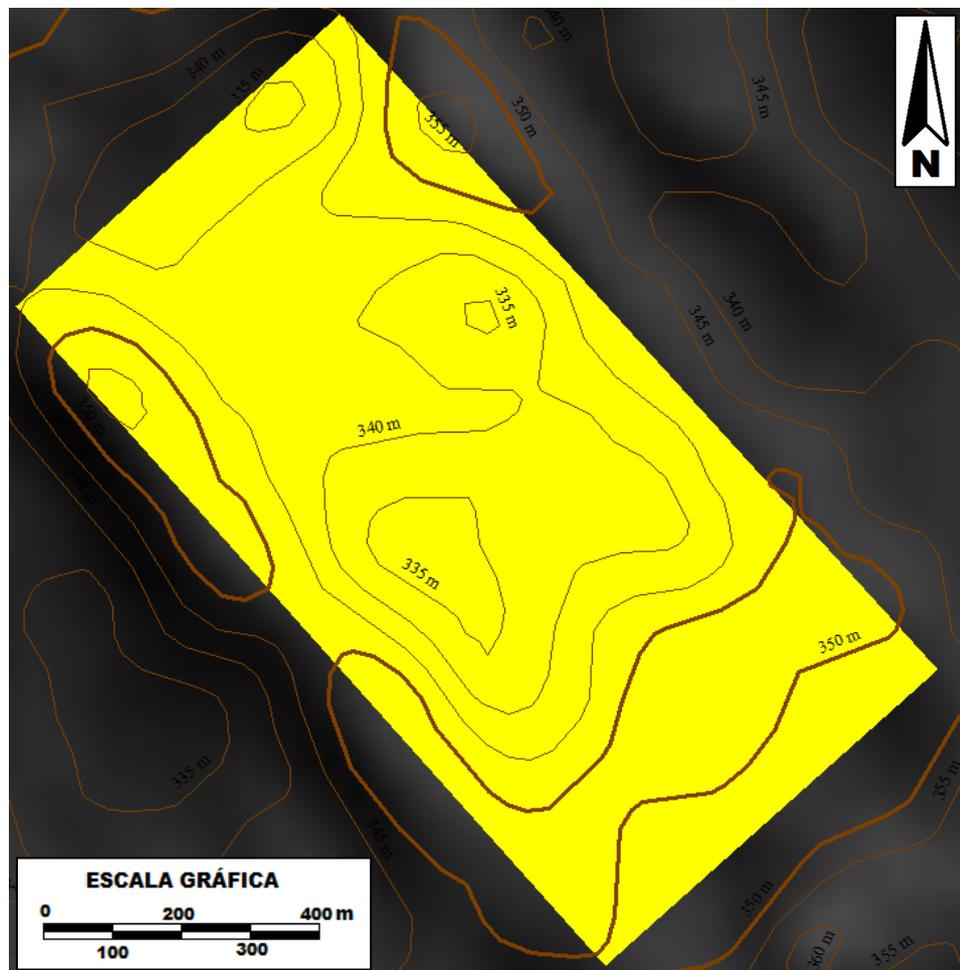


Figura 1. Vista del campo en estudio con detalle de cotas de elevación, ubicado en las cercanías de la localidad de Río Segundo, Córdoba, Argentina ($31^{\circ}36'55''\text{S}$ - $63^{\circ}59'2''\text{O}$).

El régimen climático al que pertenece la zona en estudio es el semiárido, con una precipitación media anual (promedio de la serie de años 1931-2010), de 757 mm, caracterizándose por una distribución de lluvias bastante marcada, con aproximadamente el 80% de las mismas en el período que va de octubre a marzo y el 20% restante corresponde desde abril a septiembre. La temperatura media anual es de 16,8 °C, siendo la temperatura media mínima de 9,5°C para el mes de julio y la media máxima de 23,4 °C, en el mes de enero. En lo que respecta a las temperaturas extremas registradas, las mínimas absolutas, durante los meses de julio-agosto, alcanzan en algunos casos valores de hasta -10 °C, y las máximas absolutas, durante los meses de diciembre-enero, valores de hasta 40 °C. La fecha media de la primera helada es alrededor del 25 de mayo y la de última helada el 19 de septiembre. El período medio libre de heladas se extiende desde principio de septiembre a fines de mayo, con una duración de 260 días; en consecuencia, el período medio con heladas es de 105 días. En el 100% de los años ocurren heladas (Lovera *et al.*, 2012).

La historia productiva del lote en estudio registra en los últimos 9 años condiciones de siembra directa, con una secuencia de gramínea estival intercalado con soja en los últimos 4 años.

La variabilidad topográfica del terreno experimental se corresponde, a su vez, con diversidad en lo que respecta a estructura geomorfológica de los suelos. Esta multiplicidad estructural se tomó como base para la definición de tres puntos de muestreo, efectuado durante el mes de julio (2013). La clasificación taxonómica de los suelos en estudio, según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010), corresponde a un Haplustol éntico en la zona de mayor cota (sitio 1), a un Ustifluent ácuico en la posición de cota intermedia (sitio 3) y a un Durustol en fase moderadamente bien drenada en el área de menor cota (sitio 2).

Se seleccionó un sitio en la parte alta de la parcela (31°37'10,60"S-63°59'09,11"O, correspondiendo al sitio 1) y dos puntos en la parte baja de la parcela (31°36'56,54"S-63°59'25,60"O y 31°36'49,17"S-63°59'34,18"O, correspondiendo a los sitios 2 y 3, respectivamente), como se puede observar en la Figura 2. En cada uno de estos puntos se hizo una calicata, para la identificación de los horizontes del perfil a fin de su clasificación

taxonómica. De cada horizonte se tomaron muestras sin disturbar, a través de un cilindro calador de 98,12 cm³ de volumen.

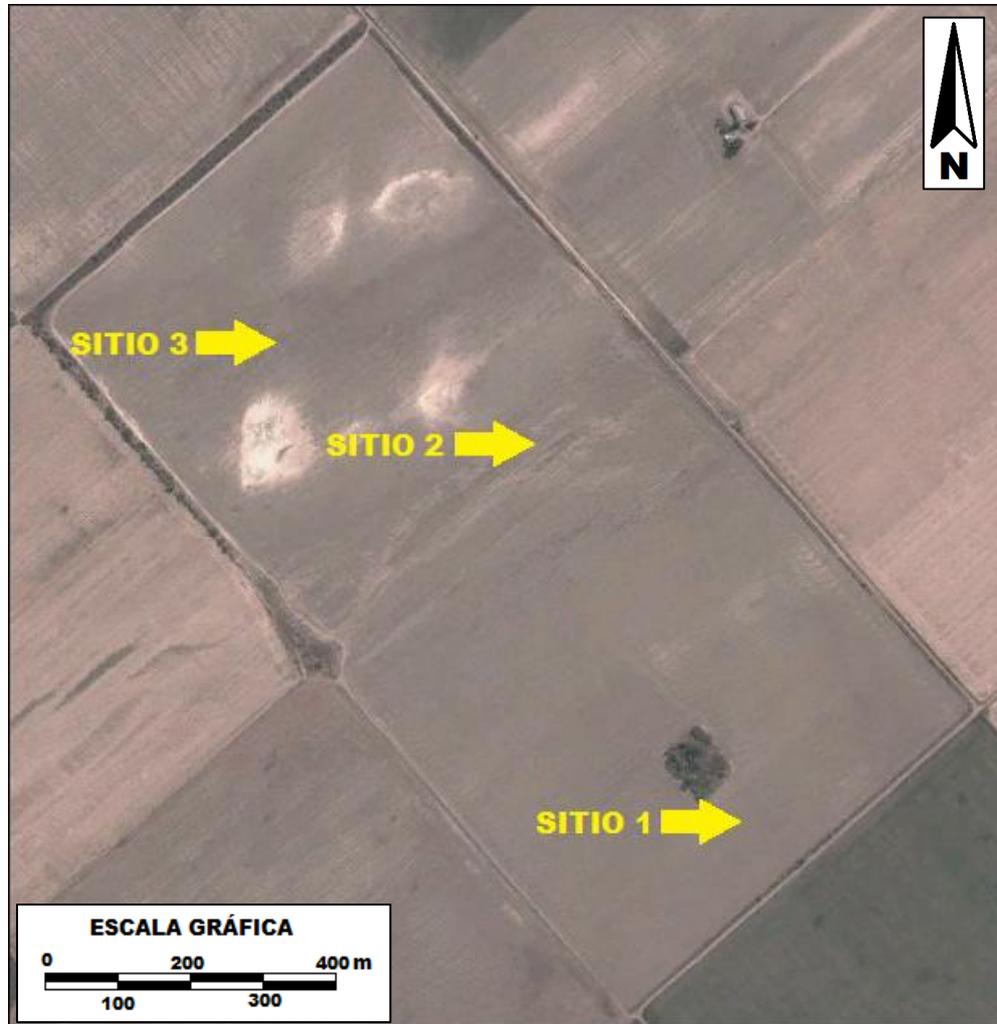


Figura 2. Ubicación de los puntos de ejecución de calicatas para la descripción taxonómica y muestreo de los suelos bajo estudio, ubicados en el área central de la provincia de Córdoba, Argentina (31°36'55"S-63°59'2"O).

Las muestras se tomaron por duplicado. El suelo se secó en estufa a 105 °C durante 48 horas, se masó y luego se calculó la relación masa/volumen para determinar los valores de densidad aparente de cada horizonte.

Se tomaron muestras compuestas por 25 submuestras disturbadas del horizonte superficial por cada sitio, muestras compuestas por 20 submuestras del horizonte

subsuperficial. Se utilizaron las 2 muestras de densidad aparente del horizonte inmediatamente inferior para efectuar las determinaciones de textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y constantes hídricas. Se obtuvo el agua retenida a -33 kPa y -1.500 kPa utilizando olla de presión y membrana de Richards, respectivamente (Klute, 1986). Se determinó la composición granulométrica por el método de la pipeta (Day, 1986). El contenido de materia orgánica (MO) fue obtenido por el método de Nelson y Sommers, 1996. La CIC se midió utilizando acetato de amonio 1M pH 7 como extractante (Wenk y Bulakh, 2004). Los datos analíticos de los tres perfiles se presentan en la Tabla 1.

Funciones de pedotransferencia

Para la evaluación de ajuste entre parámetros físicos de suelo y retención hídrica (RH), se tomaron ocho modelos desarrollados desde el año 1979 hasta 1996, todos ellos en zonas templadas. De los mismos, tres corresponden a modelos de desarrollo argentino y los otros cinco fueron obtenidos en el hemisferio norte.

Todas las ecuaciones utilizadas comparten la estructura de regresión lineal múltiple. Los modelos difieren en los coeficientes y variables, producto de los datos experimentales utilizados.

Todos los métodos emplean la textura como variable independiente. Los métodos de Pecorari *et al.* (1988), Rawls *et al.* (1982), Rawls y Brakensiek (1985) y Gupta y Larson (1979) emplean también la materia orgánica, el de De Jong *et al.* (1983) utiliza el carbono orgánico, el de Travasso y Suero (1994) el contenido de agua volumétrico a -33 kPa estimado, y el de Damiano *et al.* (1996) la actividad de la arcilla estimada por la capacidad de intercambio catiónico (Baumer, 1989). Además, los métodos de Pecorari *et al.* (1988), Rawls y Brakensiek (1985), Gupta y Larson (1979) y De Jong *et al.* (1983) utilizan también la densidad aparente. Por último, el método de Saxton *et al.* (1986) solo utiliza parámetros de granulometría. La estructura básica de cada uno de los modelos se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1. Características físico-químicas de los perfiles analizados, correspondientes a tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.

Sitio	Horizonte	Espesor (cm)	Punto de marchitez permanente (cm ³ cm ⁻³)	Capacidad de campo (cm ³ cm ⁻³)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Arcilla <2 μm (%)	Limo total 2-50 μm (%)	Limo fino 2-20 μm (%)	Arena 50-2000 μm (%)	Capacidad de intercambio catiónico (cmol _c kg ⁻¹)	Materia orgánica (%)
1	A _p	22	0,141	0,289	1,40	16,4	52,0	23,4	31,6	13,2	1,56
	AC	31	0,142	0,270	1,23	10,2	59,4	26,7	30,4	8,5	0,80
	C _k	+47	0,095	0,207	1,21	8,8	56,6	25,5	34,6	12,0	0,40
2	I	23	0,127	0,266	1,33	18,4	50,0	15,0	31,6	15,8	1,83
	II	10	0,109	0,212	1,33	16,6	37,4	11,2	46,0	13,1	1,16
	III	+17	0,125	0,244	1,67	25,6	30,4	7,6	44,0	16,3	0,66
3	I	24	0,052	0,087	1,48	9,2	14,6	3,7	76,2	5,5	0,80
	II	22	0,067	0,141	1,60	13,2	20,2	5,1	66,6	9,0	0,60
	III	+14	0,132	0,254	1,55	30,0	30,8	7,7	39,2	18,6	0,80

Tabla 2. Parámetros intervinientes en las funciones de estimación de retención hídrica para cada uno de los modelos considerados.

Modelo	Potencial mátrico (kPa)	Función de regresión
Gupta y Larson (1979)	-33	$\theta = 3,075\text{Arc} \cdot 10^3 + 5,886\text{Li} \cdot 10^3 + 8,039\text{Arc} \cdot 10^3 + 2,208\text{MO} \cdot 10^3 - 14,34\rho_a \cdot 10^2$
	-1500	$\theta = -0,059\text{Arc} \cdot 10^3 + 1,142\text{Li} \cdot 10^3 + 5,766\text{Arc} \cdot 10^3 + 2,228\text{MO} \cdot 10^3 + 2,671\rho_a \cdot 10^2$
Rawls <i>et al.</i> (1982)	-33	$\theta = 0,2576 - 0,002\text{Arc} + 0,0036\text{Arc} + 0,0299\text{MO}$
	-1500	$\theta = 0,026 + 0,005\text{Arc} + 0,0158\text{MO}$
De Jong <i>et al.</i> (1983)	-33	$\theta = [(6,4 + 2,78\text{CO} + 0,24\text{Arc}) + (-42,9 + 0,55\text{Arc}) \cdot (\log \Psi - t)] \cdot (\rho_a/100)$, para $\Psi \leq 10^4$
	-1500	$\theta = \{(6,4 + 2,78\text{CO} + 0,24\text{Arc}) + [-1,56 - 0,028(\text{Arc} + \text{Li}) - 0,24\text{CO}] \cdot (\log \Psi - t)\} \cdot (\rho_a/100)$, para $\Psi > 10^4$
Rawls y Brakensiek (1985)	-33	$\theta = 0,3486 - 0,0018\text{Arc} + 0,0039\text{Arc} + 0,0228\text{MO} - 0,0738\rho_a$
	-1500	$\theta = 0,0854 - 0,0004\text{Arc} + 0,0044\text{Arc} + 0,0122\text{MO} - 0,0182\rho_a$
Saxton <i>et al.</i> (1986)	-33	$\theta = \{33/[\text{EXP}(-4,396 - 0,0715\text{Arc} - 4,88 \cdot 10^{-4}\text{Arc}^2 - 4,285 \cdot 10^{-5}\text{Arc}^2\text{Arc}) \cdot 100]\}^{[1/B]}$
	-1500	$\theta = \{1500/[\text{EXP}(-4,396 - 0,0715\text{Arc} - 4,88 \cdot 10^{-4}\text{Arc}^2 - 4,285 \cdot 10^{-5}\text{Arc}^2\text{Arc}) \cdot 100]\}^{[1/B]}$
Pecorari <i>et al.</i> (1988)	-33	(a) $\theta = \{[6,85 + 0,360(\text{Arc} + \text{LiF})]\rho_a\}/100$
	-1500	(c) $\theta = \{[5,89 + 0,341\text{Arc} + 0,036\text{LiF} + 0,235\text{MO}]\rho_a\}/100$
Travasso y Suero (1994)	-33	$\theta = (0,5868 + 0,61\text{Arc} + 0,203\text{LiF})/100$
	-1500	$\theta = (-0,0686 + 0,476 \cdot \theta_{-33} \cdot 100)/100$
Damiano <i>et al.</i> (1996)	-33	$\theta = 0,3718 - 0,0029\text{Arc} + 1,1836(1/\text{Arc})$
	-1500	$\theta = 0,0233 + 0,0042\text{Arc} - 0,9636(1/\text{Arc}) + 0,1318\text{AA}$

θ : contenido de agua volumétrico (cm^3 agua cm^{-3} suelo). Arc: arcilla < 2 μm (%). Li: limo 2-50 μm (%). LiF: limo fino 2-20 μm (%). Are: arena 50-2000 μm (%). ρ_a : densidad aparente (Mg m^{-3}). MO: materia orgánica (%). CO: carbono orgánico MO/1,73 (%). Ψ : potencial mátrico (bares). t: (-1,12 + 0,029Arc). B: (-3,14 - 0,00222Arc² - 3,484*10⁻⁵Arc²Arc). AA: actividad de arcilla. Para Pecorari *et al.* (1988): a y c, horizonte superficial; b y d, horizontes subyacentes.

Análisis estadísticos

Con el fin de validar la función de pedotransferencia de mejor ajuste para la estimación de RH a los potenciales correspondientes a punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) en el conjunto de suelos analizados, se sometieron cada uno de los modelos a un análisis estadístico mediante el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013). Como indicadores de bondad se calculó el error medio (EM) [Ec. 1], la raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECOMP) [Ec. 2] y el coeficiente de determinación (r^2) de la regresión lineal entre los contenidos volumétricos medidos y estimados por los modelos.

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{n} \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$RECOMP = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (RH_o - RH_e)^2 \right] / n} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Dónde e_i son los errores obtenidos como diferencia entre los θ calculados y θ observados, esto es: $e_i = \theta_{c_i} - \theta_o$; RH_e son las RH estimadas, RH_o son las RH observadas y n es el número de observaciones. Este último corresponde a nueve, conformado por cada uno de los tres horizontes analizados en los tres sitios bajo estudio.

El EM puede ser interpretado como el sesgo o error sistemático del método (Damiano, 2008), por lo que revela la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar los contenidos hídricos (Santos, 2012). Por otro lado, el r^2 y el RECOMP se refieren a la precisión del modelo (Liao *et al.*, 2011), cuantificando la dispersión de los datos estimados en relación a los valores medidos.

Ponderando estos dos últimos indicadores, se realizó un ranking donde los modelos fueron ordenados desde el más confiable como predictor al menos confiable, a los fines de seleccionar el más adecuado para cumplimentar con nuestro objetivo. El EM no fue

considerado como parámetro en el ranking de validación puesto que se trata de un estimador que solo nos muestra si la función analizada subestima o sobreestima los datos reales de RH y, en este caso, no se cuenta con una considerable cantidad de observaciones como para que resulte apropiado utilizar este estadístico en la selección del modelo más confiable.

A los fines de conocer la importancia relativa de cada una de las variables utilizadas por los diferentes modelos sobre la RH asociada a los valores de las constantes hídricas, se realizó un análisis de regresión utilizando los parámetros de entrada de los modelos como variables independientes y los valores de succión matriz medidos en laboratorio, tanto a -1500 kPa como a -33 kPa, como variables dependientes, analizándolos por separado. De este análisis de regresión lineal se obtuvieron los gráficos de residuos parciales que relacionan cada componente en estudio respecto a los valores de succión matriz medidos, a los fines de librar a cada variable del efecto de interacción que incorporan el resto de los parámetros considerados.

RESULTADOS

Validación y selección de modelos de pedotransferencia

El error medio (EM), la raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECMF), el coeficiente de determinación de la regresión lineal (r^2) y el orden de mérito en relación a RECMF y el r^2 de cada uno de los modelos para los dos potenciales considerados como representativos de las constantes hídricas, se exhiben en la Tablas 3 y 4. Los valores de CAD medidos vs. estimados se presentan en las Figuras 3 y 4.

El menor valor de RECMF y el mayor valor de r^2 para el potencial mátrico de -1500 kPa lo obtuvo el modelo de Travasso-Suero, siendo éste el que mejor estimó el agua disponible en este contexto. Gupta-Larson obtuvo valores similares al anterior, aunque este último tuvo tendencia a sobreestimar el valor de punto de marchitez permanente (PMP), mientras que Travasso-Suero tuvo propensión a subestimar los valores de PMP.

Tabla 3. Error medio (EM), raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECOMP), coeficiente de determinación de la regresión lineal (r^2) y orden de mérito de los modelos analizados en función de RECOMP y r^2 , para el potencial mátrico de -1500 kPa, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.

Modelo	EM	RECOMP	r^2	Ranking
Travasso-Suero	-0,023	0,029	0,607	1
Gupta-Larson	0,067	0,029	0,579	2
Rawls-Brakensiek	0,016	0,031	0,437	3
Pecorari	0,052	0,033	0,426	4
Rawls	0,014	0,036	0,310	5
Damiano	-0,001	0,038	0,338	6
Saxton	0,008	0,037	0,273	7
De Jong	0,005	0,041	0,036	8

El modelo de Rawls-Brakensiek obtuvo el puesto 3 del ranking, seguido por Pecorari, ambos con valores similares de RECOMP y r^2 . Los dos modelos tuvieron tendencia a sobreestimar el agua retenida a PMP.

Los modelos de Rawls, Damiano y Saxton obtuvieron los puestos 5, 6 y 7 en el orden de mérito, respectivamente. Los tres modelos tendieron a sobreestimar los valores de retención hídrica a PMP.

Por último, el modelo de De Jong completa el ranking de precisión en la estimación de agua retenida a -1500 kPa, con una leve tendencia a sobreestimar los valores de PMP.

En lo que respecta al agua retenida a -33 kPa, el modelo de Rawls-Brakensiek fue el que obtuvo el mayor ranking considerando el RECOMP y el r^2 . Muy cercano a este en precisión de estimación encontramos 4 modelos más, correspondientes a Damiano, Saxton, Rawls y Gupta-Larson. Estos ocuparon los puestos 2, 3, 4 y 5 en el orden de mérito,

respectivamente. Los 5 modelos mencionados tuvieron un desempeño similar en la estimación de la retención hídrica a capacidad de campo (CC), presentando valores de RECOMP entre 0,030 y 0,038, y un r^2 entre 0,825 y 0,888. Les siguieron en el ranking los modelos de Pecorari y Travasso-Suero, ocupando los puestos 6 y 7 del orden de mérito, respectivamente.

Tabla 4. Error medio (EM), raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción (RECOMP), coeficiente de determinación de la regresión lineal (r^2) y orden de mérito de los modelos analizados en función de RECOMP y r^2 , para el potencial mátrico de -33 kPa, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.

Modelo	EM	RECOMP	r^2	Ranking
Rawls-Brakensiek	0,031	0,031	0,888	1
Damiano	0,053	0,030	0,867	2
Saxton	0,033	0,034	0,860	3
Rawls	0,038	0,035	0,858	4
Gupta-Larson	0,078	0,038	0,825	5
Pecorari	0,030	0,055	0,673	6
Travasso-Suero	-0,034	0,065	0,582	7
De Jong	-0,031	0,080	0,092	8

El modelo de Travasso-Suero presentó tendencia a subestimar el agua retenida a -33 kPa, al igual que el modelo de De Jong, que ocupó el último lugar en el ranking, de la misma forma que en la estimación de agua retenida a -1500 kPa.

El resto de los modelos tendieron a sobreestimar la retención hídrica a CC.

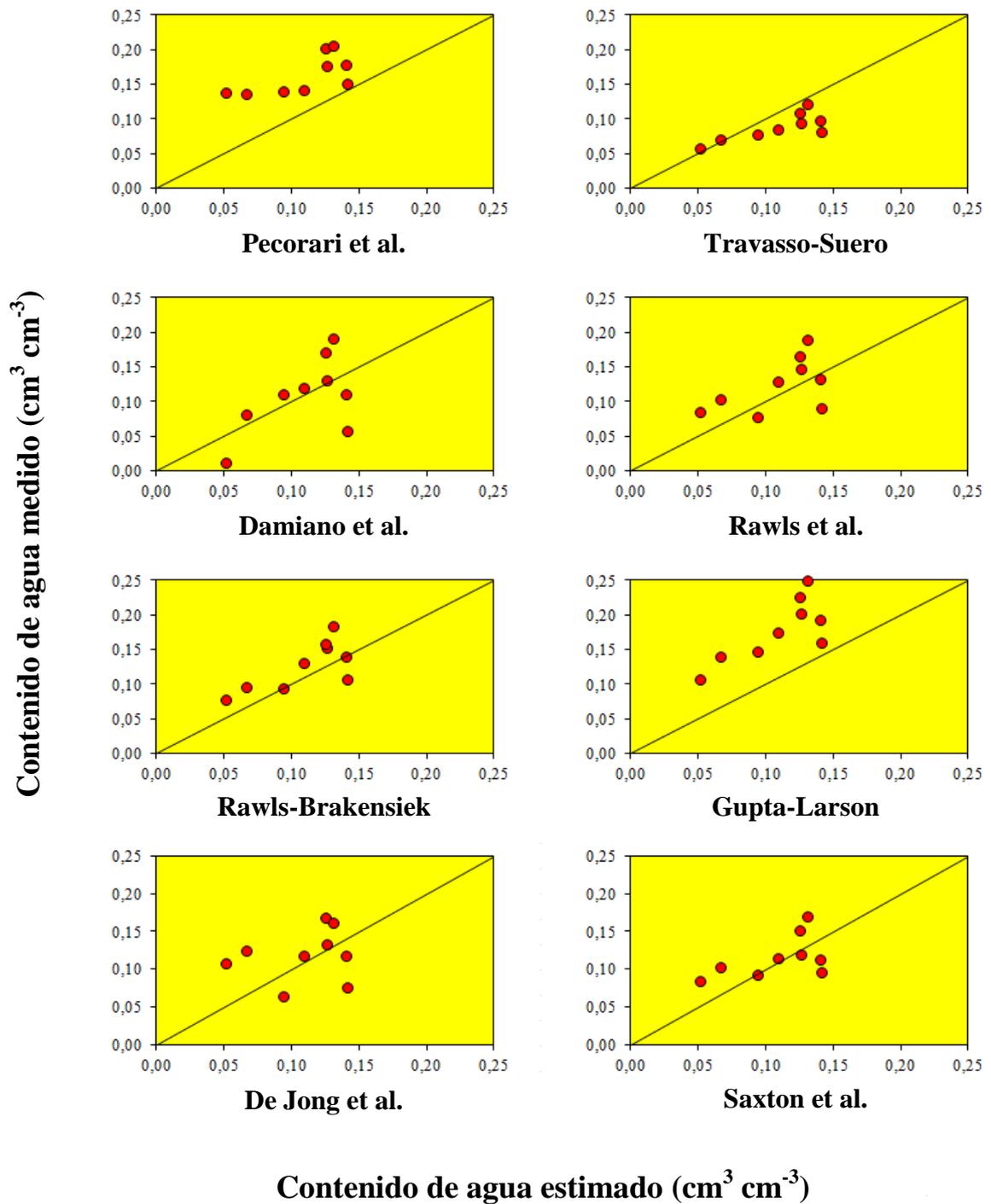


Figura 3. Relación entre el contenido de agua volumétrico a -1500 kPa medido en laboratorio vs. contenido de agua volumétrico a -1500 kPa estimado por los diferentes modelos, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.

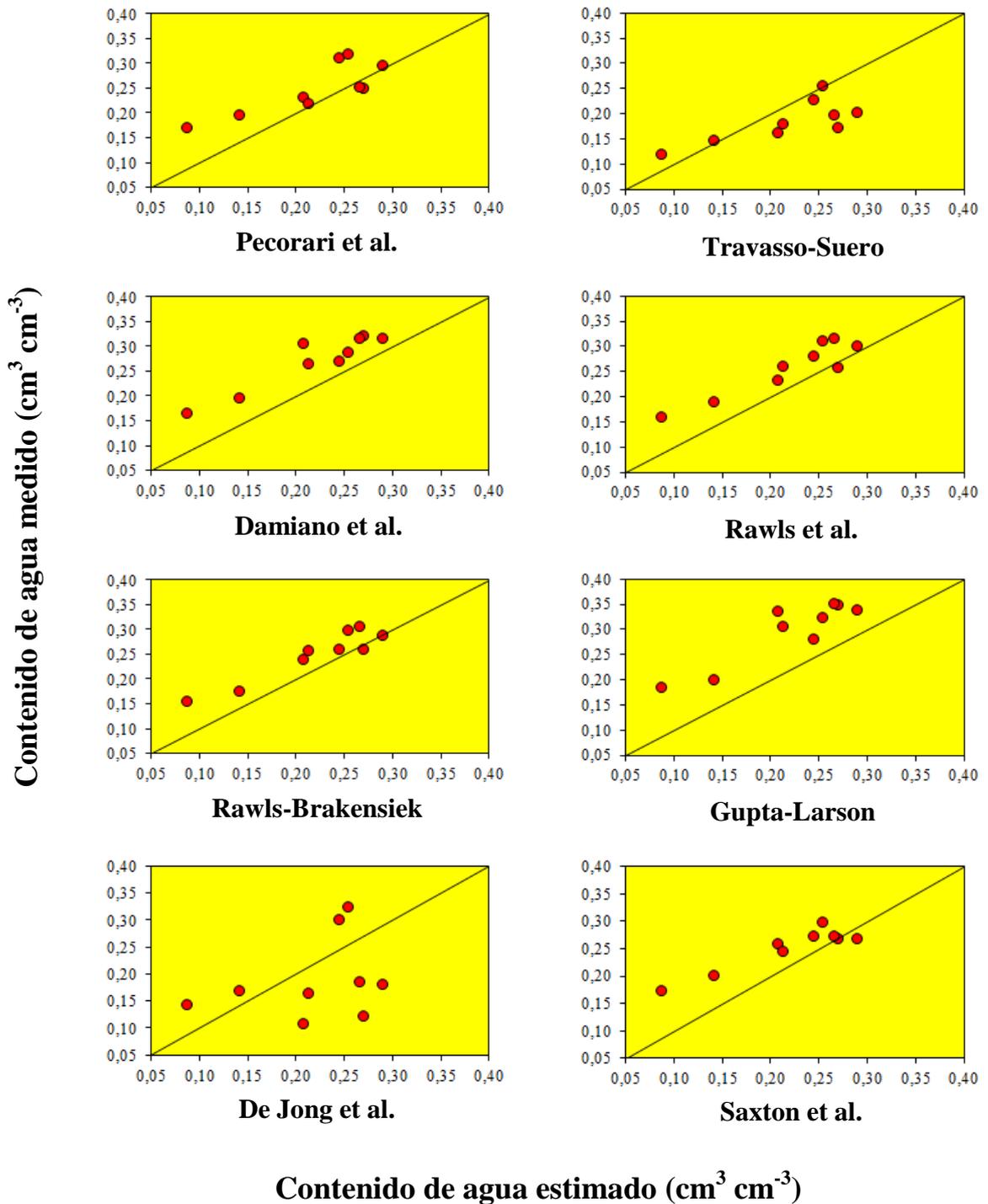


Figura 4. Relación entre contenido de agua volumétrico a -33 kPa medido en laboratorio vs. contenido de agua volumétrico a -33 kPa estimado por los diferentes modelos, considerando un conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.

Estudio de los predictores de la retención hídrica a -1500 kPa y a -33 kPa.

A los fines de explicar la variabilidad en la estimación de retención hídrica a los dos potenciales matriciales considerados por los diferentes modelos en estudio, se realizó un análisis de regresión lineal para el conjunto de variables predictivas medidas a campo y en laboratorio respecto a los valores medidos en laboratorio de agua retenida a -1500 kPa y a -33 kPa.

Se presentan en las Figuras 5 y 6 los gráficos de residuos parciales de las variables predictivas respecto al agua retenida a los dos valores de succión, que resultaron representativas en la modelización, tomando como parámetro un p-valor inferior al 0,05. El modelo obtenido con las variables mencionadas, para el caso del agua retenida en PMP, presenta un r^2 del 95%.

Del análisis de los mismos se desprende que, para el conjunto de tres suelos en estudio, existe una fuerte relación lineal positiva entre la componente limosa y la succión a -1500 kPa, siendo esta la de mayor impacto en el modelo.

Del mismo modo, existe alta relación lineal positiva entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la retención hídrica en PMP.

A la inversa, podemos observar que existe una asociación lineal negativa fuerte entre la actividad de arcilla (AA) y la succión a -1500 kPa.

El resto de las variables consideradas (porcentaje de arena, porcentaje de arcilla y densidad aparente), si bien contribuyen a mejorar la estimación del modelo, no son representativas y pueden desestimarse.

Al igual que en el caso de la retención hídrica a PMP, se construyó un modelo de regresión lineal para el agua retenida a CC con todas las variables en estudio, descartándose aquellas de baja representatividad. El modelo obtenido permite explicar un 99% de la variabilidad.

Del análisis de los gráficos de residuos parciales de las variables respecto a los valores de retención hídrica a -33 kPa se desprende que, para el conjunto de tres suelos en estudio, existe una excelente asociación lineal negativa entre el porcentaje de arena y la succión a -33 kPa, siendo esta variable la de mayor impacto en el modelo.

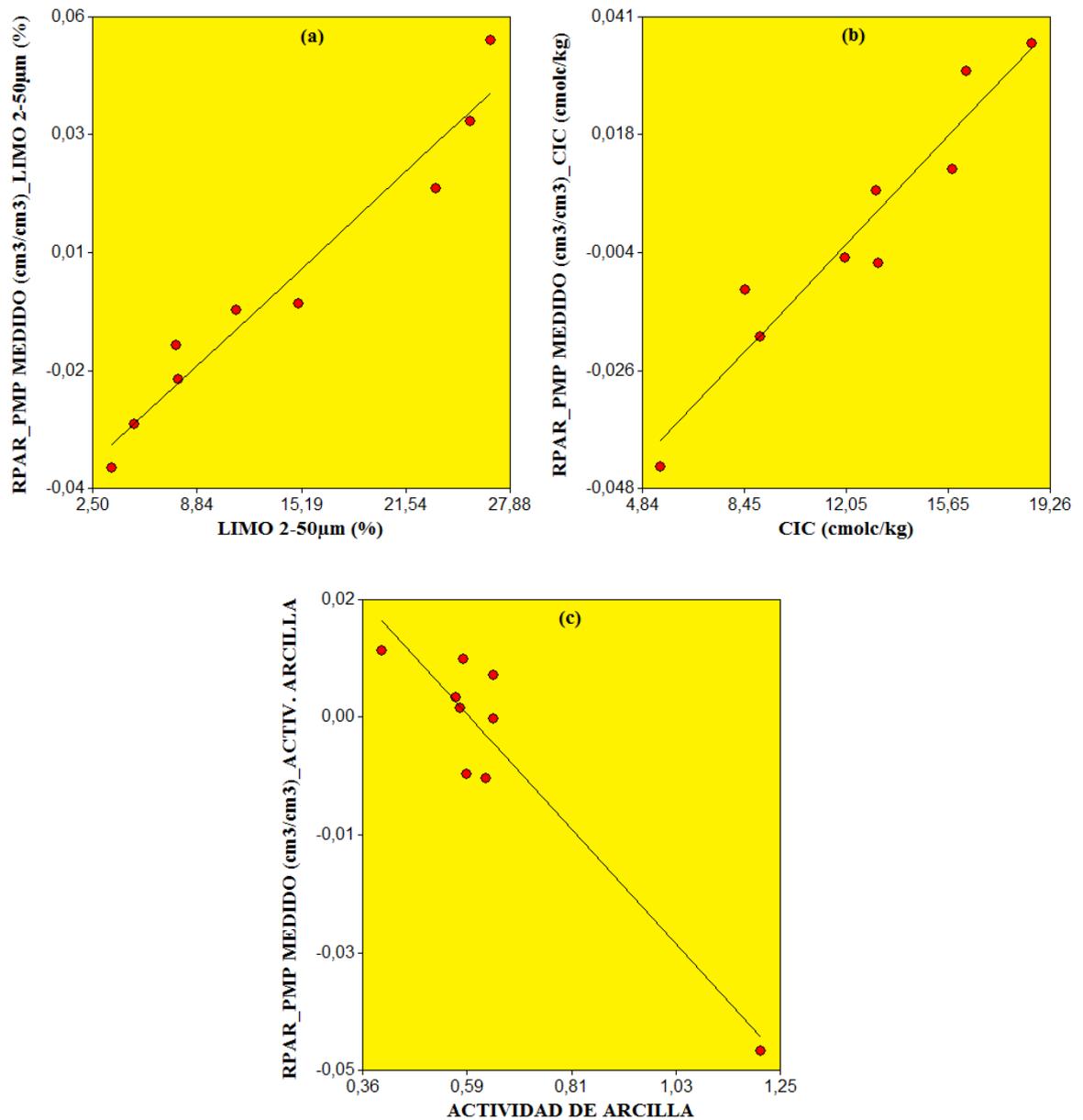


Figura 5. Gráficos de residuos parciales para el conjunto tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, que relacionan agua volumétrica retenida a -1500 kPa respecto a % de limo (a), capacidad de intercambio catiónico (b) y actividad de arcilla (c).

Del mismo modo, en los valores de retención en CC, existe una asociación lineal negativa fuerte entre la AA y la succión a -33 kPa.

Para finalizar, la última variable de alto impacto en la modelización de la retención hídrica a CC es la densidad aparente, la cual presenta una fuerte relación lineal positiva.

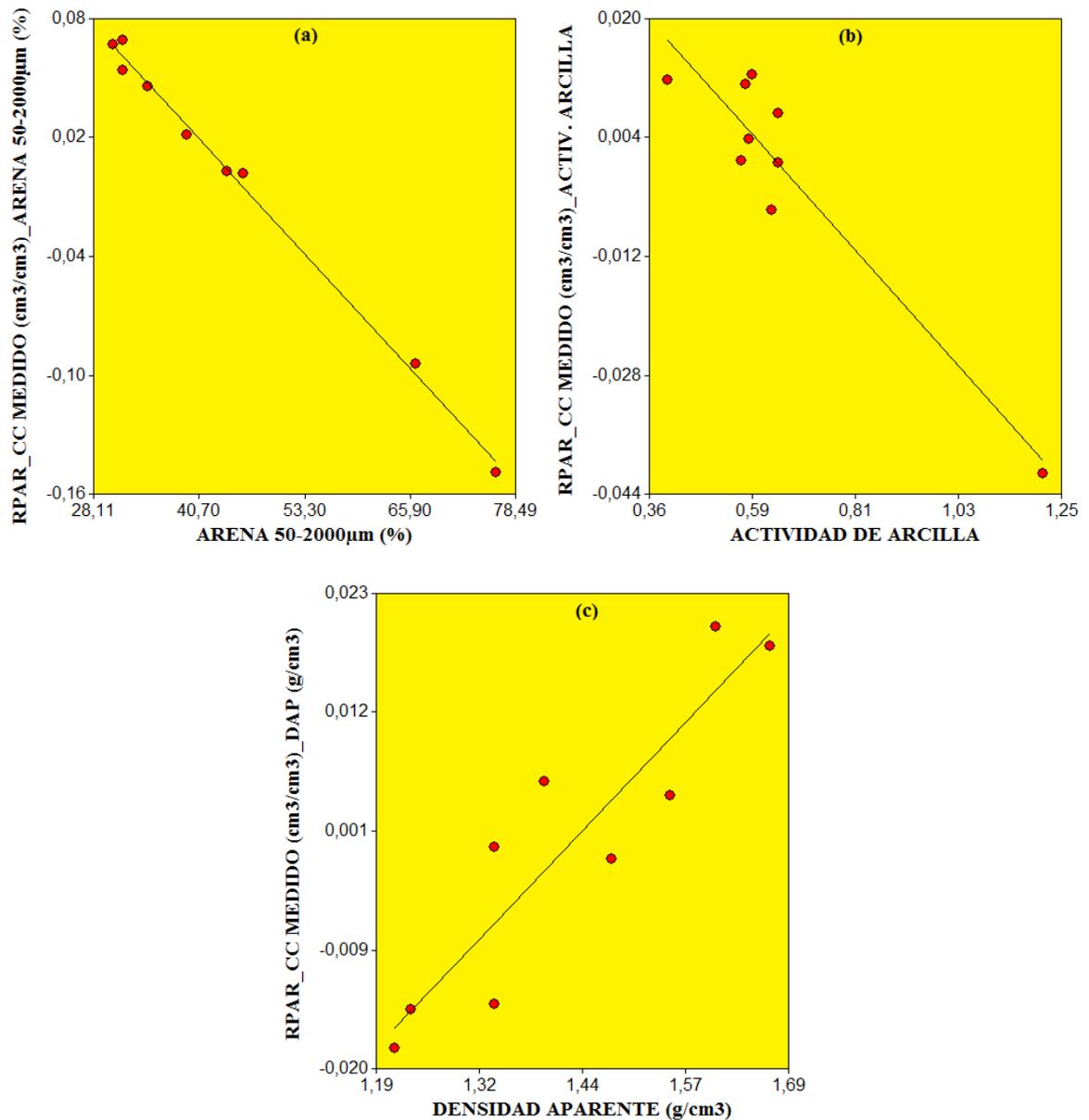


Figura 6. Gráficos de residuos parciales para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, que relacionan agua volumétrica retenida a -33 kPa respecto a % de arena (a), actividad de arcilla (b) y densidad aparente (c).

El resto de las variables en estudio (porcentaje de limo, porcentaje de arcilla y CIC), si bien aportan a mejorar la estimación del modelo, no son representativas y pueden excluirse de la modelización.

En muchas ocasiones, analizando directamente las interacciones de cada variable predictora respecto de los valores de succión matriz, no se logra visualizar las verdaderas relaciones existentes entre estos componentes, producto del efecto asociado a variables correlacionadas, por lo que se recurre a una modelización de regresión lineal y luego al análisis de los gráficos de residuos parciales, con el objetivo de eliminar el efecto de las demás variables regresoras, como se muestra en el análisis previo.

Si se compara cada variable independientemente versus los valores de retención hídrica a -1500 kPa y a -33 kPa, solo se encuentra una fuerte interacción respecto a la fracción arenosa, como se presenta en las Figuras 7 y 8.

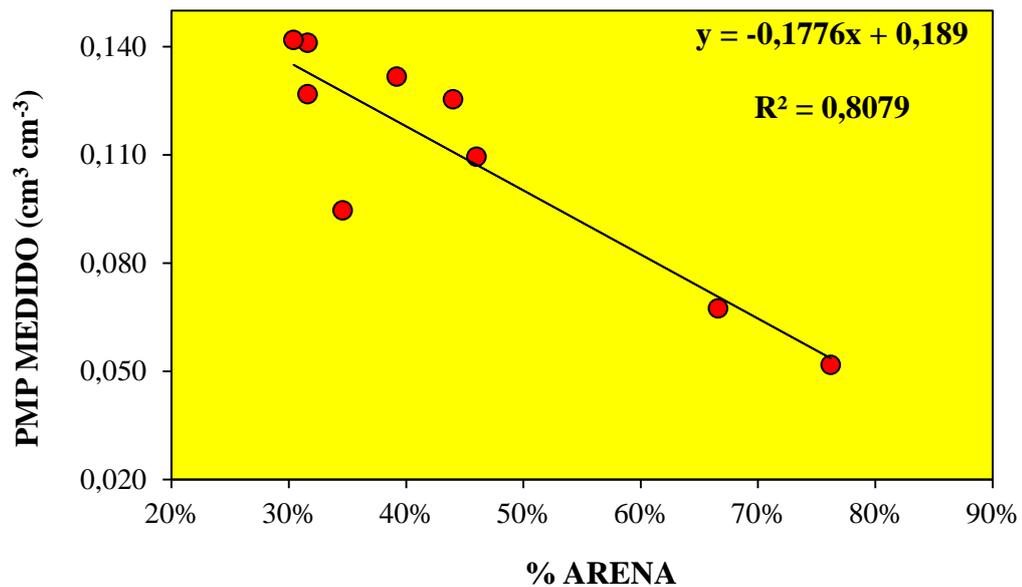


Figura 7. Gráfico de dispersión de la regresión lineal entre el contenido volumétrico a -1500 kPa y el contenido porcentual de arena, para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba.

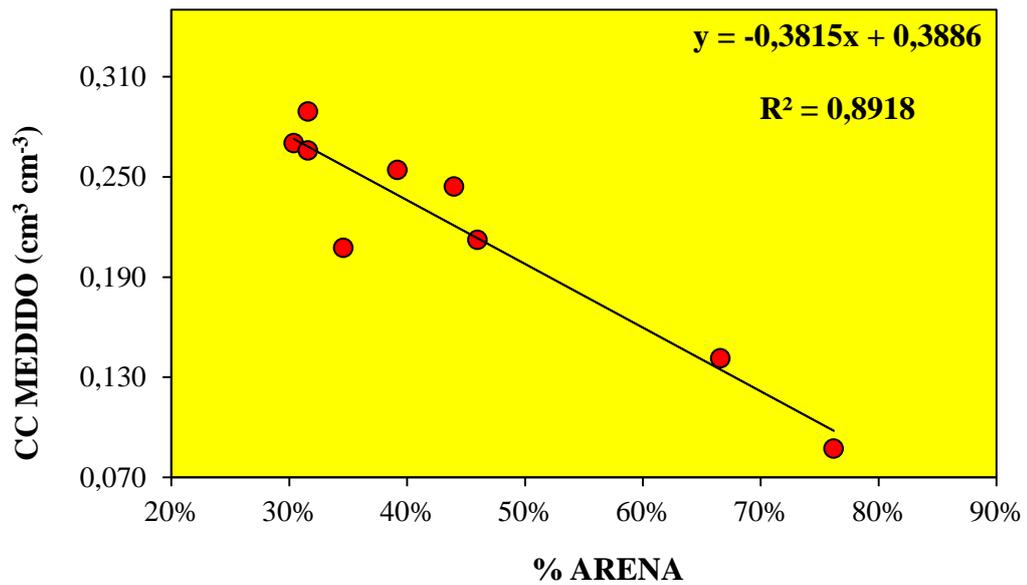


Figura 8. Gráfico de dispersión de la regresión lineal entre el contenido volumétrico a -33 kPa y el contenido porcentual de arena, para el conjunto de tres suelos del centro de la provincia de Córdoba.

DISCUSIÓN

Del análisis de los resultados, surge claramente que, de los modelos estudiados para la estimación de los valores de retención hídrica a -1500 kPa, ninguno alcanzó una performance suficientemente aceptable para ser adoptado en condiciones de campo, considerando aceptable, para los escenarios analizados, valores de r^2 superiores a 0,8 (Pachepsky *et al.*, 1999). Esto puede explicarse por varias causas, las cuales se analizan a continuación.

El hecho de someter a evaluación por diferentes modelos conjuntamente a un grupo de horizontes de diferente clase textural, puede llevar a obtener estimaciones poco precisas, siendo la mejor opción el agrupamiento de los suelos según textura, tal cual lo observaron Damiano y Taboada (2000). En el presente trabajo se evaluó la bondad de ajuste en la estimación de diferentes modelos de pedotransferencia sobre un conjunto de suelos de un área relativamente acotada, pero con características edáficas variables, tratados colectivamente. Esta es una de las principales causas que explicaron los bajos niveles de

precisión en la estimación de los valores de constantes hídricas por los modelos evaluados, especialmente en lo referido al potencial matricial de -1500 kPa. Batjes (1996) cita a Arrouays *et al.* (1993) aseverando que la estratificación pedológica es útil para mejorar la predicción de las propiedades de retención hídrica. Dos Santos *et al.* (2013) aplicando FPT en suelos del sur de Brasil, encontraron que la estratificación de los datos por clase de suelo presentó mejores resultados en la mayoría de los casos.

Otro factor importante que contribuyó a obtener resultados poco favorables en la estimación del agua retenida en PMP, tiene que ver con el origen de las FPT sometidas a evaluación. Una estrategia para mejorar la precisión en la estimación sería el desarrollo de funciones específicas para suelos de una zona limitada, ya que este tipo de modelos suelen responder mejor dentro del área del país donde son generados (Damiano y Taboada, 2000). Liao *et al.* (2011) también señalan la limitación de aplicar FPT fuera de la región donde fueron concebidas. Batjes (1996) cita a Arrouays *et al.* (1993), Tietje y Tapkenhinrichs (1993) y Kern (1995), los cuales señalan la validez de muchas FPT solo dentro del ámbito donde fueron desarrolladas. Landini *et al.* (2007) remarcan la necesidad de generar FPT para suelos de una misma región, así como explorar en el desarrollo de modelos para suelos heterogéneos. Reichert *et al.* (2009) cita a Arruda *et al.* (1987), Vereecken *et al.* (1989), Wösten *et al.* (1995), Salchow *et al.* (1996) y Pachepsky y Rawls (1999), resaltando la efectividad en la precisión cuando se utilizan ecuaciones para suelos con características más homogéneas.

Un tercer aspecto de relevancia que contribuiría a mejorar la precisión de estimación de los modelos estudiados tiene que ver con el número de observaciones. En este trabajo se sometieron a análisis tres suelos, por lo que el número de horizontes que contribuyen a la evaluación de las diferentes funciones puede considerarse escaso. Sin embargo, según las condiciones planteadas para el presente trabajo y los objetivos del mismo, se puede aseverar la dificultad que conlleva estimar las propiedades hidráulicas de suelos tan complejos a través de FPT, tanto en profundidad como la variabilidad existente dentro de un área acotada, más aun utilizando modelos no desarrollados localmente. Esto también pone en evidencia los errores en los que se puede incurrir si se toman funciones aisladas para inferir constantes hídricas de suelos particulares, por ejemplo con el objetivo

de estimar agua disponible para decidir la siembra de un cultivo invernal, o bien para decidir el momento de un riego, cuestiones prácticas para las cuales un productor o técnico podría requerir de este tipo de funciones.

Por otra parte, de los resultados podemos destacar la precisión obtenida en la estimación de los valores de retención hídrica a CC por 5 de los 8 modelos estudiados, los cuales superaron el 0,80 de r^2 . Sin embargo, caben las aclaraciones antes mencionadas también para este valor de succión matriz, ya que existe una brecha importante entre la precisión observada en la estimación en este trabajo respecto de la alcanzable, cuestión que podría mejorarse teniendo en cuenta los aspectos previamente discutidos.

El modelo de De Jong tuvo un pobre desempeño en la estimación del agua retenida tanto a -1500 kPa como a -33 kPa, explicado por la región en que se lo desarrolló, ya que este modelo tiene mejor performance en suelos de texturas finas. Así lo observaron Buccigrossi *et al.* (2010), los cuales encontraron que era el de mejor ajuste en la estimación del agua retenida a PMP en suelos arcillosos, comparándolo con otras 5 FPT.

En relación al análisis efectuado sobre cada una de las variables utilizadas por los diferentes modelos en la estimación de las constantes hídricas, respecto a los valores medidos, surgen algunas cuestiones interesantes, que se detallan a continuación.

Es bien conocido el efecto dominante de la textura sobre las características hídricas del suelo. Sin embargo, variables adicionales como el contenido de materia orgánica, densidad aparente, etc., pueden contribuir a mejorar las estimaciones de los modelos (Saxton y Rawls, 2006). Este aspecto queda de manifiesto en las Figuras 5 y 6. En las mismas se evidencia la fuerte relación existente entre algunas variables estudiadas y los valores de agua retenida tanto a -1500 kPa como a -33 kPa. Contribuyendo con lo observado por otros autores, se refleja el papel preponderante de las fracciones granulométricas en la estimación del agua retenida, evidenciado en este caso por el porcentaje de limo sobre la retención hídrica a PMP y por la fracción arenosa en la estimación del agua retenida a CC.

Teniendo en cuenta los valores de retención hídrica medidos vs. los estimados a -1500 kPa y a -33 kPa, es posible observar que 3 de los 4 modelos más precisos en la estimación a -1500 kPa comparten el uso de la fracción arenosa en su estimación. Del mismo modo, los 5 modelos más precisos en la estimación del agua retenida a CC coinciden en la utilización de la arena en sus funciones. Esto evidencia la importancia de la inclusión de componentes texturales en la modelización, representado en este caso con el porcentaje de arena en las Figuras 7 y 8. Botula *et al.* (2012) hallaron valores similares de r^2 al relacionar linealmente el contenido volumétrico a -1500 kPa y a -33 kPa con el porcentaje de arena.

Si bien el modelo lineal que relaciona el contenido volumétrico a -1500 kPa respecto de las variables predictivas le otorga mayor efectividad de predicción a la fracción limosa respecto al componente grueso, estas variables están íntimamente relacionadas, por lo que en ciertos casos la modelización de regresión lineal, luego de librar a cada variable del efecto de las restantes, puede presentar mejor estimación en una fracción textural que en otra, de acuerdo a los tipos de suelo en estudio.

En lo referido a las variables que resultaron representativas para estimar el agua volumétrica tanto en PMP como a CC, fuera de la textura, podemos mencionar que algunas de ellas no mostraron respuestas estándar, como es el caso de la actividad de arcilla y la densidad aparente, y esto puede explicarse por las características extremadamente complejas y heterogéneas que gobiernan el conjunto de suelos estudiados, en los cuales encontramos situaciones de valores extremos de carbono orgánico entre 0,2 % y 1,1 %, que influyen directamente en la actividad de arcilla, y valores de densidad aparente entre 1,2 y 1,7 Mg m⁻³. Estos aspectos pueden interferir en el verdadero efecto de cada variable aislada independientemente.

CONCLUSIONES

- De los modelos estudiados para la estimación de los valores de retención hídrica a -1500 kPa, los más destacados fueron el de Travasso-Suero y el de Gupta-Larson, aunque ninguno alcanzó una performance aceptable para ser adoptado en condiciones de campo.
- Se destaca la precisión obtenida en la estimación de los valores de retención hídrica a -33 kPa por 5 de los 8 modelos estudiados, los cuales superaron el 0,80 de r^2 . Los de mejor ajuste fueron Rawls-Brakensiek, Damiano, Saxton, Rawls y Gupta-Larson.
- En el contexto de los suelos estudiados en este trabajo, las componentes granulométricas fueron el factor determinante en la definición de la capacidad de agua disponible de los perfiles bajo análisis, tanto en PMP como a CC.
- El hecho de tratar conjuntamente suelos de diferente clase textural a través de FPT, limita la precisión en la predicción por parte de los modelos estudiados, más aún cuando el desarrollo de dichas funciones no ha sido en la zona de los perfiles que se desean estudiar y el número de observaciones es bajo.

CONSIDERACIÓN FINAL

La presente experimentación deja planteada la importancia de futuros estudios zonales y locales en el desarrollo de nuevas funciones de pedotransferencia, aplicables a las condiciones particulares de las diversas zonas productivas que componen la provincia de Córdoba, contemplando la vasta heterogeneidad en las características edáficas presente en las distintas zonas agroecológicas.

De esta manera, se podría generar información inédita de gran relevancia para el manejo eficiente de los recursos escasos, brindando una herramienta muy útil para el sector productivo, no disponible actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P., M. Cantarero. 2001. Efectos del estrés hídrico en trigo. Conferencia. Actas V Congreso Nacional de Trigo y III Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Carlos Paz, Córdoba. 2 pp.
- Allen, J.R.I. 1965. Finning upward cycles in alluvial successions. *Geol. J.* 4:229-246.
- Arrouays, I., M. Jamagne, and H. Gaillard. 1993. Sur la possibilite d'estimer les propriétés de rétention en eau des sols limoneux lessivés hydromorphes du sud-ouest de la France à partir de leurs caractéristiques de constitution. *C.R. Acad. Agric. France.* 79:111-121.
- Arruda, F.B., J. Júlio Jr., y J.B. Olivera. 1987. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo.* 11:11-15.
- Arshad, M.A., B. Lowery and B. Grossman. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. In: *Methods for assessing soil quality.* J.W. Doran and A.J. Jones (eds.) Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.49.SSSA, Madison, Wisconsin, U.S.A. pp. 123-142.
- Batjes, N.H. 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma.* 71:31-52.
- Bauer, A. and A.L. Black. 1992. Organic carbon effects on available water capacity on three soil textural groups. *Soil Sci. Am. J.* 56:248-254.
- Baumer, O.W. 1989. SCS Soil Parameters Preparation Program for DRAINMOD. DMSOIL User's Manual. USDA-Soil Conservation Service, National Soil Survey Laboratory, Lincoln, NE, U.S.A. 24 pp.
- Botula, Y.D., W.M. Cornelis, G. Baert and E. Van Ranst. 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management.* 111:1-10.
- Buccigrossi, F., A. Caliendo, P. Rubino and M.A. Mastro. 2010. Testing Some Pedo-Transfer Functions (PTFs) in Apulia Region. Evaluation on the Basis of Soil Particle Size Distribution and Organic Matter Content for Estimating Field Capacity and Wilting Point. *Italian Journal of Agronomy.* 4:367-381.
- Capitanelli, R.G. 1979. Geomorfología. En: *Geografía Física de la Provincia de Córdoba.* Banco de la Provincia de Córdoba. Ed. Boldt, Córdoba, Argentina. pp. 269-279.
- Damiano, F. 2008. Predicción del agua disponible en suelos pampeanos a través de funciones de pedotransferencia. En: *Fertilidad física de los suelos.* Taboada M.A. y C.A. Álvarez (eds.). EFA. UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 181-198.

- Damiano, F., R.A. Díaz, M.O. Grondona. 1996. Evaluación de una función uniparamétrica para la estimación de la curva de retención de agua en suelos agrícolas. XVI Congreso Nacional del Agua. San Martín de los Andes, Argentina. Trabajo N° 148.
- Damiano, F. y M.A. Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*. 18:77-88.
- Dardanelli J.L., O.A. Bachmeier, R. Sereno and R. Gil. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Research*. 54:29-38.
- Day P.R. 1986. Particle fractionation and particle-size analysis. In: *Methods of Soil Analysis (Part I)*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, C. A. Black (Ed.). Madison, Wisconsin, U.S.A. pp. 545-567.
- De Jong R. 1983. Soil water desorption curves estimated from limited data. *Can. J. Soil Sci.* 63:697-703.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, C.W. Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Dos Santos, W.J.R., N. Curi, S.H.G. Silva, E.F. de Araújo and J.J. Marques. 2013. Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center-southern Rio Grande do Sul State. *Ciência e Agrotecnologia*. 37:49-60.
- Google Earth Pro 7.1.1.1888. 2013. Río Segundo, 31°36'55"S, 63°59'2"O. Fecha de consulta: 29 de octubre, 2013. Disponible en <http://earth.google.com/>.
- Global Mapper. 2011. Global Mapper, versión 13.00. Blue Marble Geographics, Hallowell, Maine. U.S.A. Fecha de consulta: 28 de noviembre, 2013.
- Gupta, S. C. and W. E. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resour. Res.* 15:1633-1635.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics*. Academic Press, Orlando, Florida, U.S.A. 364 pp.
- Kern, J.S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of American Journal*. 59:1134-1141.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory Methods. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Ed. A. Klute (ed.). Madison, Wisconsin, U.S.A. pp. 635-662.

- Landini, A.M., D. Martinez, H. Días, E. Soza, D. Agnes y C. Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del Suelo*. Argentina. 25(2):123-131.
- Liao, K., S. Xu, J. Wu, S. Ji and Q. Lin. 2011. Assessing Soil Water Retention Characteristics and Their Spatial Variability Using Pedotransfer Functions. *Soil Science Society of China. Pedosphere*. 21(4):413-422.
- Lovera E.F., C. Alvarez y I. Severina. 2012. Información meteorológica mensual de la E.E.A. INTA Manfredi. Publicado en internet: disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/informacion-meteorologica-mensual-de-la-e.e.a.-manfredi/>.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. D.L. Sparks (ed.). Madison Wisconsin, U.S.A. pp. 961-1010.
- Pachepsky, Y.A., W.J. Rawls, D.J. Timlin. 1999. The current status of pedotransfer functions: Their accuracy, reliability, and utility in field- and regional- scale modeling. In *American Geophysical Union, Assessment of non-point source pollution in the vadose zone. Geophysical Monograph*. 108:223-234.
- Pecorari, C., L.F. Balcaza y E. Frutos. 1988. Relaciones empíricas entre contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada. Informe Técnico N° 212. EEA Pergamino. 32 pp.
- Pennock D.J. and E. De Jong. 1990. Spacial pattern of soil redistribution in boroll landscapes, Saskatchewan, Canadá. *Soil Sci*. 150:867-873.
- Puricelli C., M. Puricelli y H. Kruger. 1997. Profundidad útil del suelo y rendimiento del trigo. INTA Bordenave, Bol. Téc. 14 pp.
- Rawls, W.L., D.L. Brakensiek and K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*. 25:1316-1320.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: *Proc. Symp. Watershed Management in the Eighties*, Denver, CO. E.B. Jones and T.J. Ward (ed.). Am. Soc. Civil Eng., New York. pp. 293-299.
- Reichert, J.M. J.A. Albuquerque, D.R. Kaiser, D.J. Reinert, F. Lavarda Urach and R. Carlesso. 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ciênc*. 33(6):1547-1560.
- Salchow, E., R. Lal, N. Fausey and A. Ward. 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in Southern Ohio. *Geoderma*. 73:165-181.
- Saxton, K.E. and W.J. Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 70:1569-1578.

- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Transactions of the ASAE*. 50:1031-1035.
- Slingerland, R. and N.D. Smith. 1998. Necessary conditions for a meandering-river avulsion, *Geology (Boulder)*. 26:435-38.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys of soil taxonomy*, 11th Ed. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. 374 pp.
- Stevenson, D.S. 1974. Influence of peat moss on soil water retention for plants. *Can. J. Soil Sci.* 54:109-110.
- Taboada, M.A., F. Damiano y F.G. Micucci. 2008. Aspectos físicos que condicionan la disponibilidad de agua para los cultivos. En: *Fertilidad física de los suelos*. M.A. Taboada y C.A. Álvarez (eds.). EFA. UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 31-65.
- Tietje, O. and M. Tapkenhimichs. 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1088-1095.
- Travasso M.I. y E.E. Suero. 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín Técnico N° 125*. EEA Balcarce. 9 pp.
- Van Genuchten, M. Th., F.J. Leij and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California. U.S.A. 85 pp.
- Vereecken, H.J., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* 148:389-403.
- Vereecken, H. 1995. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*. 65:81-92.
- Viglizzo, E.F., A.J. Pordomingo, M.G. Castro, F.A. Lértora and J.N. Bernardos. 2004. Scale-dependent control on ecological functions in agroecosystems of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 101:39-51.
- Viseras C. y J. Fernández. 2010. Sistemas aluviales de alta sinuosidad. En: *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. A. Arche (ed.). Consejo superior de investigaciones Blanco S. L., España. pp. 261-297.
- Wenk, H.R. and A. Bulakh. 2004. *Minerals: Their constitution and origin*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. 666 pp.
- Wosten J.H.M., P.A. Finke, and M.J.W. Jansen. 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*. 66:227-237.