

ESTIMACIÓN DE HUMEDADES CARACTERÍSTICAS EN SUELOS LIMOSOS MEDIANTE DIFERENTES FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA.

Dr Ing. Erik Zimmermann

CONICET y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina, e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

palabras claves: suelos limosos, humedades características, curvas de retención de humedad

RESUMEN

En este trabajo se han utilizado diferentes procedimientos para estimar humedades características de suelos limosos, representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica, y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA. Se utilizaron valores de referencia característicos propuestos por Rawls y otros (1982), Carsel y Parrish (1988) y Zimmermann (2006a, 2006b) y funciones de pedotransferencia (FPT) propuestas por un conjunto de autores y otras incluidas en los códigos SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap et al, 1999) para las composiciones texturales de las 136 muestras analizadas. Se concluye que los resultados obtenidos ofrecen una gran dispersión entre los diferentes procedimientos empleados dando la pauta que los predictores se deben emplear con precaución. Para las estimación de humedades de punto de marchitez permanente y capacidad de campo en la cuenca del A° Ludueña puede recomendarse las ecuaciones propuestas por Rawls *et al.* (1982). Para la estimación de humedad residual y de saturación puede considerarse el código Rosetta o bien la ecuación propuesta por Wösten *et al.* (1999).

ABSTRACT

In this work, different procedures have been used to estimate characteristic moistures of silt soils, representative of a sector of the Argentinean flatlands. It was used grain size, and physical-chemical information of soil maps printed by the National Agriculture Technology Institute (INTA). Characteristic reference values (Rawls et. al, 1982; Carsel and Parrish, 1988; Zimmermann 2006a, 2006b), pedotransfer functions (PTF) included in the codes SOILPAR (Acutis and Donatelli, 2003) and Rosetta (Schaap et to the, 1999) together with others PTFs were used for 136 analyzed samples of soils. Results showed a great dispersion among the different used procedures. Consequently the methods should be used with caution. The equation proposed by Rawls *et al.* (1982) gave good results for wilting point and field capcacity estimations in Ludueña's catchment. The Rosetta's code and Wösten *et al.* (1999) equation gave good results for saturation and irreductible moistures estimation.

INTRODUCCIÓN

El interés en la zona no saturada (ZNS) ha aumentado en los últimos años debido a la evidencia creciente de la afectación ambiental provocada por actividades agrícolas e industriales. En este ambiente, los modelos numéricos son rutinariamente usados en investigación y gestión para predecir el movimiento de agua y solutos en la ZNS.

Los resultados de las aplicaciones sólo pueden ser confiables si las propiedades del medio poroso son conocidas. Esto representa la principal limitación a la tecnología actual de modelos sofisticados que se encuentra en un estado avanzado con respecto al conocimiento de los parámetros que engloban esos modelos.

En trabajos de calibración de modelos hidrológicos continuos; se ha demostrado la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos, observables en el sistema mediante los niveles freáticos, y los procesos hidrológicos superficiales, observables a través de volúmenes de escurrimiento, frente a los parámetros hidráulicos que caracterizan la zona no saturada (Zimmermann, 2003). Esto resalta el rol protagónico que ejerce la zona vadosa en la recarga freática y en la infiltración, que constituyen los procesos que interconectan la hidrología superficial y la subterránea. La zona no saturada debe ser analizada con detenimiento ya que en ella se da lugar a importantes procesos de intercambio de flujo.

Para caracterizar el medio no saturado se requiere del conocimiento de las curvas de conductividad $k(\theta)$, y retención $\psi(\theta)$ o bien, difusividad $D(\theta)$, siendo θ , el contenido volumétrico de humedad, $k(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mátrico del suelo y $D(\theta)$ el coeficiente de difusividad.

Muchos de los modelos analíticos para tales curvas utilizan valores del contenido volumétrico de humedad correspondientes a puntos característicos tales como: saturación, saturación irreductible, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

En trabajos previos (Zimmermann 2006a, 2006b) se han estimado, para los suelos típicos de la llanura pampeana santafecina, valores de referencia de los parámetros que gobiernan sus funciones hidráulicas.

Estos valores fueron obtenidos de distintas fuentes de información: calibraciones de modelos matemáticos hidrológicos (Zimmermann, 2003), resultados de ensayos compilados de estaciones de INTA y las curvas de retención calibradas (Zimmermann 2006b) con la información de la base de datos pública recopilada por el departamento de agricultura de EEUU, USDA, denominada UNSODA (Leij *et al.*, 1996). En el mismo trabajo se propusieron regresiones entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos (densidad húmeda, contenido orgánico, porosidad y pH) con el fin de pronosticar los primeros en función de los demás parámetros (Zimmermann y Basile, 2006, 2007).

Paralelamente se han propuesto un conjunto de funciones de pedotransferencia basadas en diferentes propiedades fisico-químicas del suelo que han sido ajustadas a otras bases de información edafológica.

Entre las más conocidas se pueden citar los trabajos de Rawls *et al.* (1982), Rawls y Brakensiek (1985), Cosby *et al.* (1984), Saxton *et al.* (1986), Vereecken *et al.* (1989), Sharpley y Williams (1990), Hutson y Wagenet (1992), Damiano *et al.* (1996), Wösten *et al.* (1999).

Existen códigos informáticos que incluyen modelos de pedotransferencia tales como el SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap *et al.*, 1999)

En este trabajo se ha puesto atención a las ecuaciones que definen las humedades características de los suelos, aplicando las propuestas mencionadas precedentemente a perfiles tipo de suelos pampeanos de la provincia de Santa Fe y comparándolas con el objetivo de analizar la semejanza en los resultados.

MODELOS ANALITICOS DE CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD

Aunque se han propuesto muchas funciones empíricas para la curva de retención son pocas las que tienen una base fenomenológica. Una de las más conocidas y populares es la de Brooks y Corey, según la cual:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_c}{\psi}\right)^\lambda & \text{si } \rightarrow |\psi| \geq |\psi_c| \\ 1 & \text{si } \rightarrow |\psi| < |\psi_c| \end{cases}$$

donde θ_s es el contenido de humedad para medio saturado, θ_r es la humedad correspondiente a saturación irreductible, λ es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros, ψ_c es la succión crítica (presión de entrada de aire) y S_e es la saturación efectiva.

Para soslayar las limitaciones de la curva de Brooks y Corey, específicamente la discontinuidad en la zona de saturación, se han propuesto curvas con forma sigmoideal. Entre ellas se destaca la de van Genuchten, cuya expresión es la siguiente:

$$S_e = \left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^{-m}$$

donde α , m y n son parámetros empíricos. Este modelo de curva de retención tiene más flexibilidad para adaptarse a las curvas reales ya que depende de cinco parámetros independientes (α , m , n , θ_s , θ_r). En la práctica resulta conveniente restringir los valores de m y n de forma que: $m = 1 - 1/n$. Con ello se obtienen expresiones sencillas de la curva de conductividad que se deriva de ella. La curva de van Genuchten incluye la de Brooks y Corey como un caso particular cuando n tiende a infinito, siendo el producto $n.m$ constante. En este caso λ es igual a $n.m$ y $\alpha = 1/\psi_c$.

PARAMETROS DEL SUELO PARA LAS FUNCIONES HIDRAULICAS DE SUELOS NO SATURADOS

Existen métodos indirectos para estimar las propiedades hidráulicas de suelos, que varían en términos de metodología y complejidad, pudiendo distinguirse tres grupos principales: los métodos basados en la distribución del tamaños de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia.

Los primeros se usan frecuentemente para estimar conductividad hidráulica no saturada y la curva de retención de humedad con las funciones de Brooks-Corey o Van Genuchten. Se han propuesto métodos cuasi-físicos que usan el concepto de similitud de la forma entre distribuciones del tamaño de poros y de

la partícula (Arya y París, 1981, Haverkamp y Parlange, 1986).

Los métodos inversos están basados en la resolución numérica de la ecuación de Richards junto un algoritmo de optimización y paralelamente mediciones de campo o laboratorio. Ajustando los resultados del modelo a los medidos se puede obtener los parámetros hidráulicos del suelo en forma indirecta. Los métodos inversos son a menudo vulnerables por la no singularidad de los resultados, es decir, dos o más juegos de parámetros optimizados pueden ser aplicables al problema estudiado.

Las funciones de pedotransferencia (FPT) ofrecen un tercer método para estimar propiedades hidráulicas usando el hecho que las mismas se relacionan con la composición textural del suelo entre otra información taxonómica disponible. (ej., la distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etc.). Sin embargo, la gran mayoría de FPTs son completamente empíricas y no usan ningún concepto físico.

En este trabajo se ha empleado ésta tercer vía para la estimación de humedades características, es decir se han cuantificado las FPTs

Funciones de Pedotransferencia utilizadas:

Existen un conjunto de ecuaciones que relacionan propiedades hidráulicas de suelos con parámetros físicos y granulométricos de las muestras.

Hay diferentes tipos de FPTs. Un primer tipo se basa en clasificar los suelos por su *composición textural* y asignar iguales parámetros asumiendo que suelo de similar textura tienen parámetros hidráulicos similares (ej. Carsel y Parrish, 1988 y Rawls et al 1982).

Otro grupo de FPT se basan en ecuaciones de regresión lineal y/o no lineal ofreciendo una solución con propiedades hidráulicas que varían en forma continua a través del triángulo de clasificación textural del USDA. Las predicciones pueden ser mejoradas usando propiedades físicas del suelo como información adicional tales como la densidad aparente, porosidad o contenido de materia orgánica, en suelos de la región pampeana de Argentina). Otros autores mejoran la predicción incluyendo uno o más puntos de la curva de retención (Rawls et al.,

1992; Williams et al., 1992), p.ej. las humedades correspondientes a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, con potenciales mátricos de -33 KPa y -1500 KPa, respectivamente.

En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones de regresión que se han empleado para las comparaciones en este trabajo

En la misma se incluyen regresiones lineales múltiples entre los parámetros hidráulicos y otras características físicas y *granulométricas* para muestras de suelos limosos extractadas de la base UNSODA (Zimmermann y Basile, 2006, 2007).

Tabla 1. Funciones de pedotransferencia empleados para estimación de humedades características del suelo.

FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA	FUENTES
$\theta_{-1500} = 0,0854 - 0,0004.A + 0,0044.C + 0,0122.MO - 0,0182.DA$ $\theta_{-33} = 0,3486 - 0,0018.A + 0,0039.C + 0,00228.MO - 0,0738.DA$	Rawls y Brakensiek, 1985.
$\theta_{-1500} = 0,026 + 0,005.C + 0,0158.MO$ $\theta_{-33} = 0,2576 - 0,002.A + 0,0036.C + 0,0299.MO$	Rawls <i>et al</i> 1982
$\theta_{-1500} = 0,00208 + 0,007.C - 0,00003.C^2 + 0,0224.DA^2 \cdot \frac{CIC}{C}$ $\theta_{-33} = 0,2756 + 0,64.\theta_{-1500} - 0,0013.A + 0,00217.DA.C$	EPIC-ASW code, Sharpley and Williams, 1990
$\theta_{-1500} = 0,0854 - 0,0004.A + 0,0044.C + 0,0122.MO - 0,0182.DA$ $\theta_{-33} = 0,3486 - 0,0018.A + 0,0039.C + 0,0228.MO - 0,0738.DA$	LEACHM code, Hutson and Wagenet, 1992):
$\theta_{-1500} = 0,0611 + 0,004.C + 0,0005.L + 0,005.CO$	British Soil Service (topsoil) (LEACHM code, Hutson and Wagenet, 1992):
$\theta_{-1500} = 0,0233 + 0,0042.C - 0,9636.C^{-1} + 0,1318.AA$ AA = $(CIC - CIC_{co}) / C$ actividad de la arcilla $CIC_{CO} = CO \cdot \left[2,9 + \left(\sqrt{e/2/3} \right) \right]$ e: espesor horizonte (cm) $\theta_{-33} = 0,3718 - 0,0029.A + 1,1836.A^{-1}$	Damiano <i>et al</i> 1996
$\theta_s = 0,7919 + 0,001691.C - 0,29619.DA - 0,000001491.L^2 + 0,0000821.MO^2 + 0,02427.C^{-1} + 0,01113.L^{-1} + 0,01472.\ln(L) - 0,0000733.MO.C - 0,000619.DA.C - 0,001183.DA.MO - 0,0001664.\text{top}.L$ $\theta_r = 0.1$	(Wösten <i>et al.</i> , 1999)
$\theta_s = 0,803 - 0,283.DA + 0,0013.C$ $\theta_r = 0,015 + 0,005.C + 0,014.CO$	Vereecken <i>et al.</i> , 1989
$\theta_s = (50,5 - 0,142.A - 0,037.C) / 100$	Cosby <i>et al.</i> 1984
$\theta_s = 0,332 - 0,0007251.A + 0,1276.\log_{10}(C)$	Saxton <i>et al.</i> 1986
$\theta_s = 0,8757 + 0,0847\eta - 0,3188\delta_h$ (ARCILLA LIMOSA) $\theta_s = 0,1261 + 0,4006\eta + 1,273d_g$ (FRANCO ARCILLO-LIMOSO) $\theta_s = 0,5318 + 0,1578\eta - 0,1528\delta_h + 0,0003682CV_g$ (FRANCO LIMOSO)	Zimmermann y Basile, 2007

Glosario de Variables

DA (tm⁻³): Densidad aparente,
 CIC (cmol(+) kg⁻¹): Capacidad de intercambio catiónico,

C (%)	Contenido de arcilla
A (%)	Contenido de arena
L (%)	Contenido de limo
CO (%)	Contenido de carbono orgánico
MO (%)	Contenido de materia orgánica
pH	Concentración de hidrogeniones
top:	Variable cualitativa binaria (0, 1) que indica si el estrato es superficial (1) o no (0).
θ_{-33} ($m^3 m^{-3}$):	Contenido de humedad a -33 kPa, capacidad de campo
θ_{-1500} ($m^3 m^{-3}$):	Contenido de humedad a -1500 kPa, punto de marchitez permanente.
θ_r ($m^3 m^{-3}$):	Contenido de humedad residual
θ_s ($m^3 m^{-3}$):	Contenido de humedad para el suelo saturado
η (adimensional)	Porosidad,
δ_h (g/cm^3)	Densidad húmeda,
δ_s (g/cm^3)	Densidad seca,
d_g (mm)	Diámetro geométrico,
CV_g	Coefficiente de variación geométrico.
β_2	Curtosis adimensional,

Los parámetros granulométricos se obtienen de la siguiente forma:

Escala sedimentológica ϕ : $\phi = -\log_2 d$ siendo d diámetro de la partícula (mm). Los parámetros estadísticos considerados para las distribuciones granulométricas son diámetro medio ϕ_m , desvío Estándar σ , curtosis K , curtosis adimensional β_2 . Los mismos se calculan en la escala ϕ de la siguiente manera:

$$\phi_m = \sum_{i=1}^N \bar{\phi}_i f_i, \quad \sigma = \left[\sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^2 f_i \right]^{1/2}, \quad K = \sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^4 f_i, \quad \beta_2 = \frac{K}{\sigma^4}$$

donde f_i es la fracción en peso asociada al

diámetro d_i . El diámetro medio geométrico d_g , el desvío estándar geométrico σ_g y el coeficiente de variación geométrico CV_g se obtienen a través de los respectivos valores definidos en la escala ϕ mediante las ecuaciones:

$$d_g = 2^{-\phi_m}, \quad \sigma_g = 2^\sigma, \quad CV_g = \frac{d_g}{\sigma_g}$$

Para la implementación práctica de algunas FPT se han desarrollado varios códigos de cálculo entre los que pueden mencionarse los programas Rosetta[®] y SoilPar[®]. Ambos fueron utilizados en este trabajo y se describen sucintamente a continuación.

Programa Rosetta

Rosetta implementa funciones de pedo-transferencia que predicen las curvas de retención y conductividad basadas en ajustes de composición textural, densidad aparente y en uno o dos puntos de la curva de retención (punto de marchitez permanente y/o capacidad de campo).

Rosetta fue desarrollado por Marcel G. Schaap en el United States Salinity Laboratory (USDA), Riverside, California supervisado por Leij y van Genuchten. Esta versión del software refleja el estado del arte en las FPTs hasta el año 1999.

Este programa emplea para el ajuste de parámetros redes neuronales para mejorar las predicciones de las FPTs empíricas. Los parámetros hidráulicos óptimos, relacionados con datos de la entrada

(tamaño de partícula, densidad aparente, etc.) se obtienen mediante un procedimiento de calibración iterativo. Diversos autores opinan que los ajustes alcanzados superan los de los métodos anteriormente mencionados (Schaap *et al.* 1999).

El software es de distribución libre y gratuita y puede obtenerse mayor información consultando la página web <http://www.usssl.ars.usda.gov>.

Programa SOILPAR

SOILPAR 2.0 es un programa para estimar parámetros hidráulicos del suelo desarrollado por Marco Acutis (Departamento de Ingeniería Agrícola y Agronomía Territorial, Nápoles, Italia) y Marcello Donatelli (Instituto de Investigación para Cultivos Industriales, Bologna, Italia).

El programa permite guardar información de suelos en un banco de datos georeferenciado, estimar parámetros hidráulicos de suelos usando varios procedimientos incorporados al programa, comparar las estimaciones contra datos medidos en forma gráfica y/o tabulada, y crear mapas que usan el formato ESRI.

Once métodos estiman uno o más de las características siguientes: contenido de humedad para diferentes tensiones matriciales, conductibilidad hidráulica saturada, y densidad aparente. Tres métodos estiman los parámetros de curvas de retención (Brooks-Corey, Hutson-Cass, Van Genuchten), y un método para estimaciones de conductibilidad hidráulica no saturada y parámetros de curvas de retención (Campbell). El software corre bajo Windows 98/NT/2000/XP y es de acceso libre vía internet.

Los procedimientos de pedotransferencia se clasifican en: a) Estimación puntual de algunos valores específicos de interés de la curva de retención de humedad, conductibilidad hidráulica no saturada y densidad aparente; b) Estimación de parámetros de curvas de retención.

El programa permite el ajuste de parámetros para las curvas de retención, en caso de contar con datos medidos de contenido de humedad y potencial matricial mediante un procedimiento de calibración no lineal. El mismo está basado en el método simplex con restricciones, para evitar inconsistencias físicas en los valores ajustados.

SOILPAR es un software disponible gratuito con propósitos no-comerciales. El paquete de la instalación puede obtenerse de: <http://www.isci.it/tools>.

APLICACIÓN A LAS SERIES DE SUELOS TÍPICAS EN LA REGIÓN SUR DE LA PROVINCIA DE SANTA FE (PAMPA HUMEDA ARGENTINA).

La llanura chaco-pampeana de Argentina, de clima templado húmedo, está caracterizada por un relieve de moderada pendiente topográfica.

El área meridional de la provincia de Santa Fe, motivo de interés en este estudio (Figura 1), presenta un módulo pluviométrico del orden de los 1000 mm y la temperatura media anual del orden de los 17 °C. La unidad estratigráfica superior del paquete sedimentario, que constituye el sustrato geológico de los sistemas hidrológicos, está compuesta por el loess de la formación pampeana, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis varía entre 30 y 150 metros.

Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe, elaborados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), clasifican, desde un punto de vista textural, a los suelos de la región entre las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa.

A los fines de aplicar los procedimientos descritos se contó con información elaborada por INTA, que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio. De las cartas de suelos disponibles se extrajo la información de los perfiles tipo siguientes:

A. Juarez	Los Nogales
Arequito	Maizales
Casilda	Monte Fiore
Chabas	Pergamino
Faustina	Peyrano
Gelly	Roldan
Hansen	Santa Lucia
Huemul	Villada
Juncal	Villa Eloisa
Las Gamas	Zavalla
Lima	

En cada uno de los veintiún (21) perfiles, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan entre 3 y 8 sub-horizontes de los cuales se las cartas de suelo publicó la granulometría, junto a otros parámetros bio-físicos tales como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, etc. El conjunto de estratos para todas las series estudiadas totalizan ciento treinta y seis (136) muestras de suelo.

A manera de ejemplo se presenta en la Tabla 2 los datos y estimaciones realizadas con el software SoilPar para la serie Casilda, con sus 8 estratos.

El mismo trabajo se realizó para cada uno de los horizontes de las series, obteniéndose densidades aparentes, humedades para capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad irreductible y de saturación entre otros parámetros para las curvas de retención de humedad.

Fueron aplicadas también las ecuaciones de las regresiones multivariadas presentadas en Tabla 1.

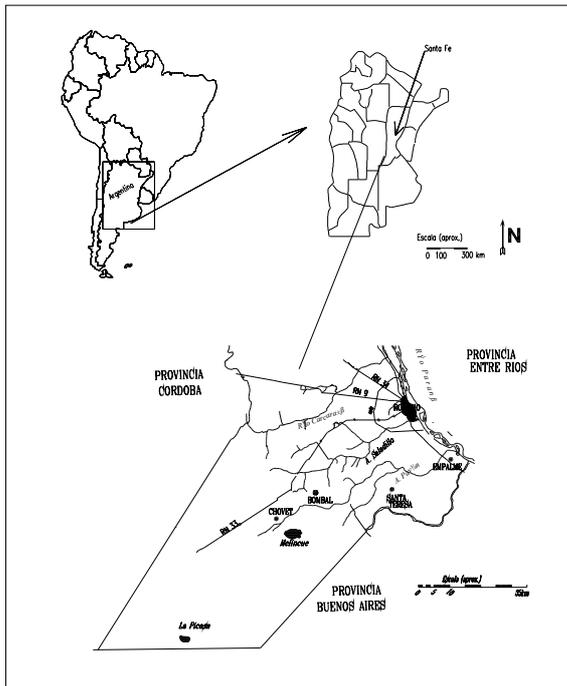


Figura 1. Area de estudio: sector meridional de Santa Fe

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la aplicación de los criterios conjuntos mencionados, para los perfiles tipo de suelo seleccionados, se muestran en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

Como se puede apreciar, las metodologías empleadas arrojan resultados disímiles, para todas las humedades características. Se ha utilizado, solo a los fines de poder realizar las comparaciones, a los resultados de SoilPar como referencia para las humedades de capacidad de campo y punto de marchitez permanente y los de Rosetta como referencia para las humedades residuales y de saturación.

Respecto al pronóstico de humedades de capacidad de campo (Figura 2), se observa que las formulaciones de Damiano (1996) y Sharpley y Williams (1990) exceden en más de un 20% los pronósticos de SoilPar mientras que la formulación de Hutson y Wagenet (1992) lo hace por defecto.

Algo similar sucede con la estimación del punto de marchitez permanente (Figura 3), aunque en este caso la formulación de Damiano se aparta del patrón

que siguen las demás, mostrando valores por exceso y defecto respecto al pronóstico del SoilPar.

Esto no significa que una u otra formulación sea mejor o peor, ya que no hay información de campo o laboratorio que permita identificar aquella que mejor represente los datos reales.

Respecto a las humedades residuales y de saturación, se han comparado el conjunto de ecuaciones de pedotransferencia con los resultados del programa Rosetta, como se mencionara precedentemente. El programa Rosetta pronostica parámetros bajo opciones diferentes en función de la información disponible. Hay un primer nivel de información requerida que contempla la clasificación textural (Rosetta SSC), un segundo nivel que adiciona a los requerimientos la densidad aparente (Rosetta SSCB) y un tercer nivel que requiere como información adicional las humedades de capacidad de campo y punto de marchitez permanente (clasificación textural, densidad y humedades límites - SSCB θ_{33} - θ_{1500}).

La Figura 4 muestra las estimaciones de la humedad residual. Allí se observa que cualquiera de las opciones de Rosetta pronostica θ_r dentro de un rango aproximado al 20%. EL programa SoilPar presenta patrones disímiles y evalúa tanto por defecto como por exceso. La formulación de Vereecken (1989) propone estimaciones por exceso e incluso valores bastante alejados de los promedios recomendados por Rawls y Brakensiek ó Carsel y Parrish, p. ejemplo.

La Figura 5 muestra las estimaciones para la humedad de saturación. En términos generales hay mucho menos dispersión que para las otras humedades características. Casi todos los pronósticos caen dentro del +/- 20%. Se podría afirmar que es el parámetro que puede pronosticarse con menor variabilidad.

Debido a que la información granulométrica disponible en las cartas de suelo no incluye una curva de distribución no fue posible aplicar las ecuaciones propuestas por Zimmermann y Basile (2007, 2008).

Tabla 2. Propiedades granulométricas, físicas e hidráulicas estimadas para la serie Casilda

	Unidades	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Profundidad	(m)	0.18	0.27	0.48	0.76	1.04	1.28	1.80	2.10
Densidad seca (Rawls)	(t/m3)	<i>1.46</i>	<i>1.44</i>	<i>1.42</i>	<i>1.38</i>	<i>1.39</i>	<i>1.42</i>	<i>1.45</i>	<i>1.44</i>
PMP (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	<i>0.19</i>	<i>0.22</i>	<i>0.22</i>	<i>0.28</i>	<i>0.23</i>	<i>0.19</i>	<i>0.14</i>	<i>0.16</i>
CC (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	<i>0.39</i>	<i>0.42</i>	<i>0.40</i>	<i>0.46</i>	<i>0.40</i>	<i>0.35</i>	<i>0.31</i>	<i>0.32</i>
Contenido de arena muy gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena media	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Arena fina	(%)	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	1.00	1.80	1.30
Arena muy fina	(%)	8.20	5.50	4.20	2.50	4.60	6.90	9.80	6.90
Contenido de limo	(%)	69.90	64.40	61.70	49.60	55.80	62.80	67.80	68.20
Contenido de arcilla	(%)	19.87	28.57	33.07	46.87	38.07	29.27	20.57	23.57
coarse fragment content	(%)								
Materia orgánica	(%)	2.55	2.29	1.22	0.99	0.49	0.27	0.15	0.10
Capac. Intercambio Catiónico	(cmol/kg)	16.70	19.30	21.40	30.60	29.80	24.70	18.80	20.60
pH - en agua		6.20	6.40	6.60	7.00	7.10	6.80	7.50	8.20
Humedad a 10 (-J/kg)	(m/m)								
Humedad a 20 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	<i>0.43</i>	<i>0.46</i>	<i>0.44</i>	<i>0.49</i>	<i>0.44</i>	<i>0.39</i>	<i>0.35</i>	<i>0.36</i>
Humedad a 30 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	<i>0.39</i>	<i>0.42</i>	<i>0.41</i>	<i>0.46</i>	<i>0.40</i>	<i>0.35</i>	<i>0.31</i>	<i>0.32</i>
Humedad a 50 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	<i>0.34</i>	<i>0.38</i>	<i>0.37</i>	<i>0.42</i>	<i>0.36</i>	<i>0.32</i>	<i>0.27</i>	<i>0.28</i>
Humedad a 100 (-J/kg) (Brakensiek & R _z)	(m/m)	<i>0.31</i>	<i>0.34</i>	<i>0.33</i>	<i>0.39</i>	<i>0.33</i>	<i>0.29</i>	<i>0.24</i>	<i>0.26</i>
Humedad a 500 (-J/kg) (Brakensiek & R _z)	(m/m)								
Humedad a 1500 (-J/kg) (Brakensiek & F)	(m/m)	<i>0.19</i>	<i>0.22</i>	<i>0.23</i>	<i>0.28</i>	<i>0.23</i>	<i>0.19</i>	<i>0.15</i>	<i>0.16</i>
Conductividad Hidráulica saturada (Puck)	(mm/h)	<i>31.01</i>	<i>5.56</i>	<i>2.29</i>	<i>0.15</i>	<i>0.85</i>	<i>4.84</i>	<i>27.00</i>	<i>14.93</i>
vanGenuchten α	(1/cm)	<i>0.0014</i>	<i>0.0010</i>	<i>0.0017</i>	<i>0.0010</i>	<i>0.0019</i>	<i>0.0036</i>	<i>0.0051</i>	<i>0.0053</i>
vanGenuchten m	(adim)	<i>0.53</i>	<i>0.19</i>	<i>0.17</i>	<i>0.14</i>	<i>0.41</i>	<i>0.35</i>	<i>0.37</i>	<i>0.33</i>
vanGenuchten n	(adim)	<i>2.14</i>	<i>1.24</i>	<i>1.21</i>	<i>1.16</i>	<i>1.68</i>	<i>1.54</i>	<i>1.58</i>	<i>1.48</i>
vanGenuchten θ_r	(adim)	<i>0.18</i>	<i>0.01</i>	<i>0.03</i>	<i>0.02</i>	<i>0.20</i>	<i>0.16</i>	<i>0.13</i>	<i>0.13</i>

Referencias: Los valores en *itálica* son estimados aplicando el programa SoilPar.

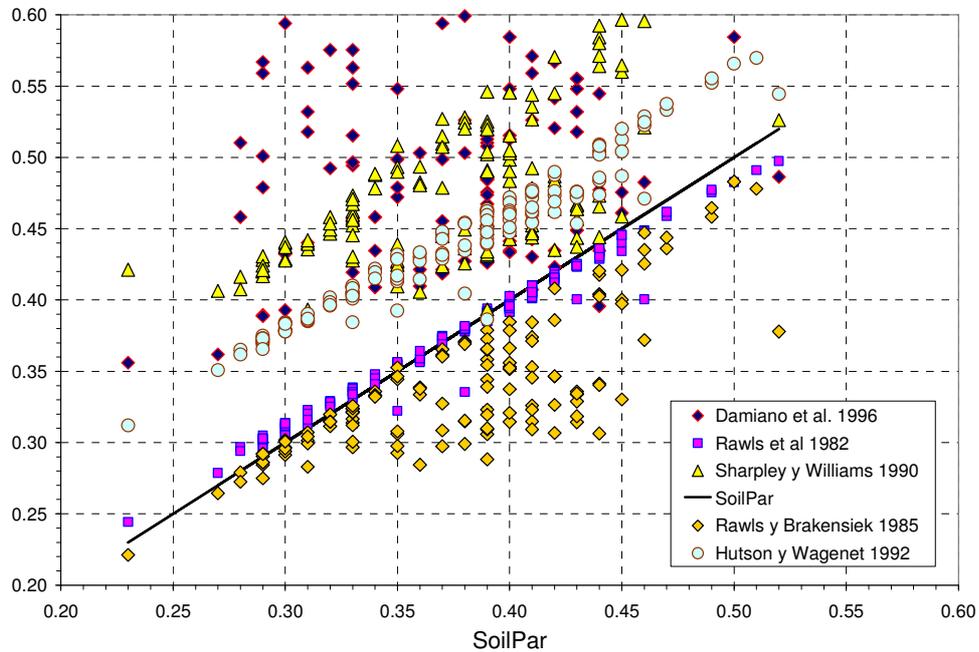


Figura 2. Estimación de la humedad de capacidad de campo, θ_{33}

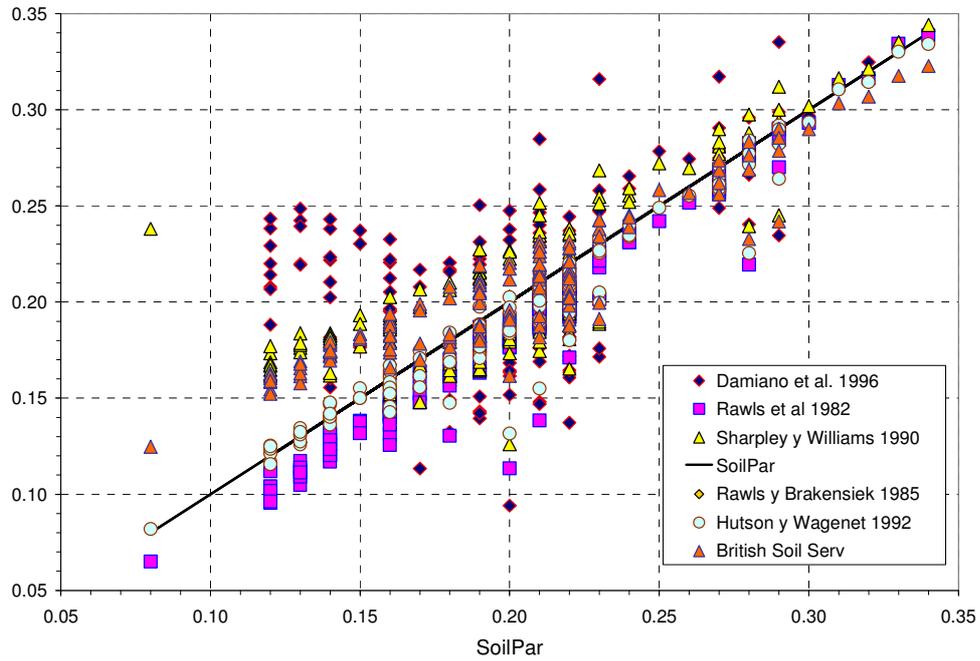


Figura 3. Estimación del punto de marchitez permanente, θ_{-1500}

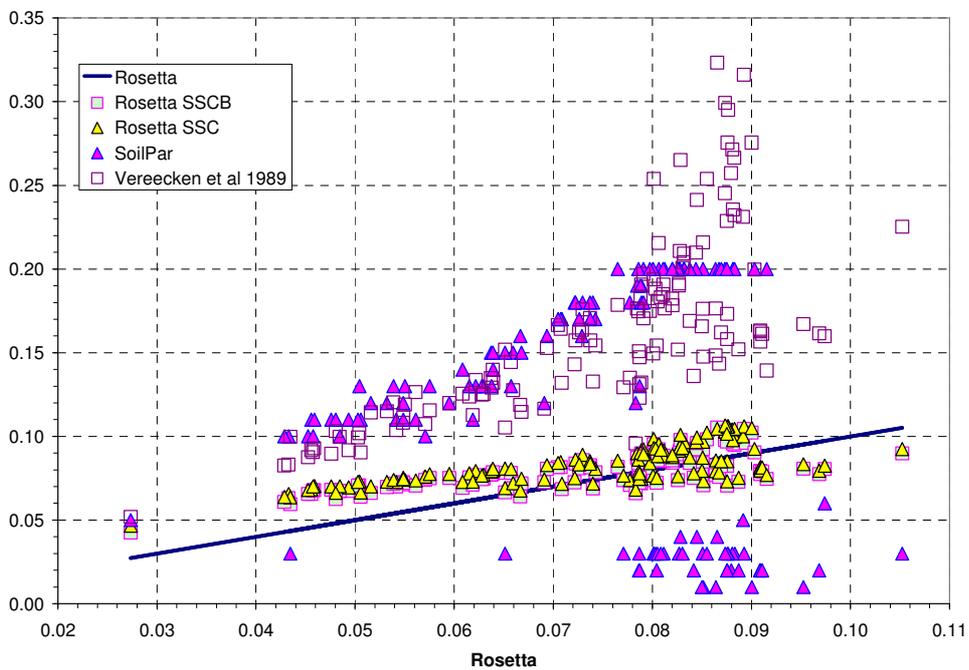


Figura 4. Estimación de la humedad residual, θ_r

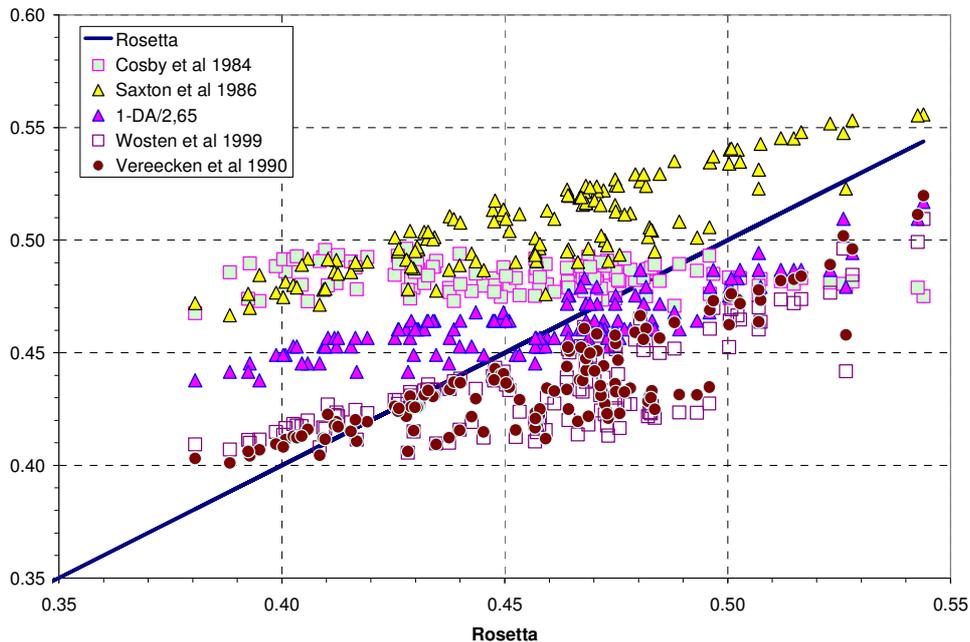


Figura 5. Estimación de la humedad de saturación, θ_s

Los resultados, puestos de manifiesto en las Figuras, dan la pauta que se debe considerar con precaución el empleo de las ecuaciones ajustadas ya que dan resultados muy distintos para una misma caracterización físico-química de un suelo.

Probablemente las muestras utilizadas para el ajuste de las FPTs internas de cada software, aunque presenten la misma clasificación textural, propiedades físicas y químicas semejantes, no permiten un predictor que pronostique comportamientos hidráulicos semejantes. Es decir, hasta el momento no pueden obtenerse ecuaciones aplicables “universalmente”.

Resultados para la cuenca del A° Ludueña.

Las formulaciones analizadas se han aplicado a las series de suelos presentes en la cuenca del A° Ludueña, cuyas asociaciones se combinan arealmente de acuerdo a la distribución porcentual que se muestra en la Tabla 3 y gráficamente en la Figura 6.

Los valores de las humedades características se han promediado por horizonte (A y B según cartas de suelo de INTA) y ponderado arealmente de acuerdo a los porcentajes de asociaciones y series

presentados en la Tabla 3.

El horizonte B mantiene predominantemente una textura arcillo-limosa, mientras que el horizonte A presenta una textura franco-limosa.

Las Tablas 4 y 5 presentan los valores medios de las humedades características ponderados arealmente y promediados por horizontes para las diferentes FPTs consideradas en los análisis.

En la Tabla 4 se observan valores elevados para las humedades de capacidad de campo estimadas con las metodologías propuesta por Damiano *et al.* (1996) y Sharpley y Williams (1990), hecho también observado en las Figuras anteriores. El valor propuesto por Rawls y Brakensiek (1985) para la humedad de capacidad de campo en el horizonte “A” parece estar subestimado. Por simplicidad y en función de la información disponible para la estimación de humedades de punto de marchitez permanente y capacidad de campo en la cuenca del A° Ludueña puede recomendarse las ecuaciones propuestas por Rawls *et al.* (1982).

En la Tabla 5, el valor de humedad residual estimado según Rawls *et al.* (1982) parece estar subestimado mientras que los valores estimados por

Vereecken *et al.* (1989) parecen estar sobrestimados (hecho también que fue evidenciado en la Figura 4).

curvas de retención de humedad, se considera que el código Rosetta o bien la ecuación propuesta por Wösten *et al.* (1999) dá buenos resultados en las predicciones.

Para la estimación de humedad residual y de saturación, empleadas como parámetros para las

Tabla 3. Composición entre asociaciones y series de suelo en cuenca Ludueña.

Asociaciones	Area de influencia (%)	Composición % por Series				
		Gelly	MFiore	Peyrano	Roldán	Zavalla
Py	24.7			100		
Py15	0.2			100		
Py20	1.0			100		
Py2x	1.7			100		
Py8	3.0			100		
Rd	9.3				100	
Rd10	15.3	20	20		30	30
Rd11	1.8	20	40		40	
Rd12	15.9	10	20		70	
Rd15	9.2	20	20		50	10
Rd8	3.3	30			70	
Za2	2.2	20	30			50
Za3	8.3	20	30			50

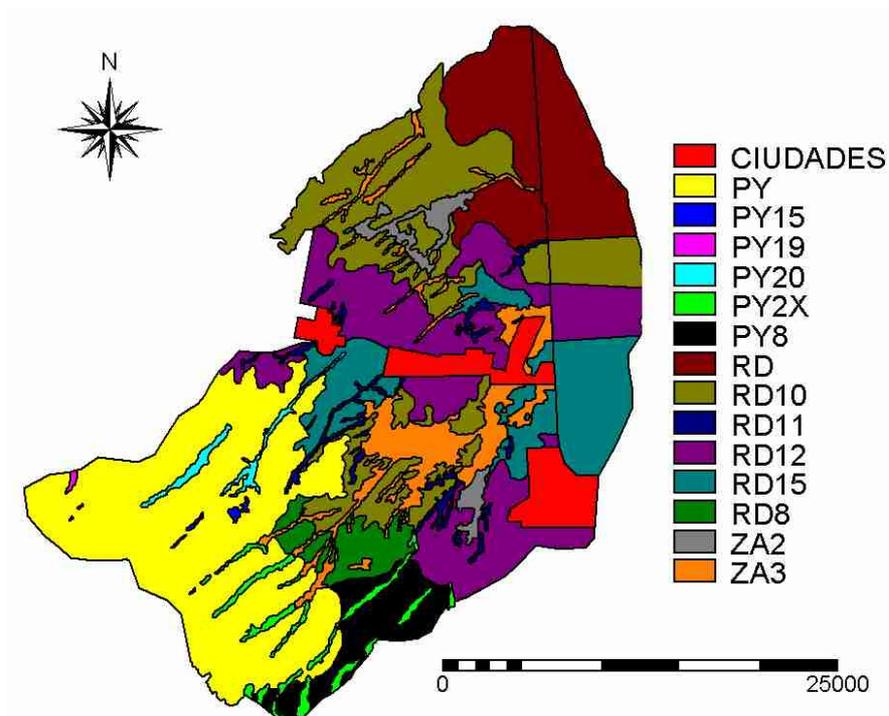


Figura 6. Distribución de las asociaciones de suelos en la cuenca del Arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina)

Tabla 4. Humedades de capacidad de campo y punto de marchitez permanente estimadas para la cuenca del A° Ludueña bajo diferentes FPTs.

Autores	$\theta_{-1500} - \theta_{-33}$ (cm ³ /cm ³)			
	Horizonte "A"		Horizonte "B"	
	θ_{-1500}	θ_{-33}	θ_{-1500}	θ_{-33}
Rawls y otros, 1982	0.18	0.40	0.29	0.46
SoilPar	0.20	0.40	0.30	0.47
Damiano, 1996	0.16	0.64	0.30	0.78
Sharpley y Williams, 1990 EPIC ASW	0.18	0.46	0.30	0.61
Rawls y Brakensiek, 1985	0.19	0.33	0.29	0.44
British Soil Service	0.20		0.29	
Hutson y Wagenet, 1992	0.19	0.46	0.29	0.54

Tabla 5. Humedades residuales y de saturación estimadas para la cuenca del A° Ludueña bajo diferentes FPTs..

Autores	$\theta_r - \theta_s$ (cm ³ /cm ³)			
	Horizonte "A"		Horizonte "B"	
	θ_r	θ_s	θ_r	θ_s
Rawls y otros, 1982	0.02	0.50	0.06	0.48
SoilPar	0.11		0.03	
Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ (cuenca Ludueña)	0.08	0.47	0.09	0.52
Rosetta SSCB (cuenca Ludueña)	0.08		0.10	
Vereecken et al, 1989	0.15	0.43	0.27	0.48
Cosby et al, 1984		0.49		0.48
Wosten et al, 1999	0.10	0.42	0.10	0.48
Saxton et al, 1986		0.50		0.55
Aplicando $\theta_s = 1 - (DA/2,65)$		0.46		0.49
Zimmermann, 2006 (promedios de 141 muestras de UNSODA)		0.43		0.53

CONCLUSIONES

Se han utilizado diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos, representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica, y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA.

Se emplean funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap *et al*, 1999) junto con un conjunto de ecuaciones propuestas por Rawls *et al* (1982), Rawls y Brakensiek (1985), Cosby *et al.* (1984), Saxton *et al.* (1986), Vereecken *et al.* (1989), Sharpley y Williams (1990), Hutson y Wagenet (1992), Damiano *et al* (1996), Wösten *et al.* (1999) y otros.

Los procedimientos se aplican a un conjunto de 21 perfiles tipo de series de suelos los que totalizan 136 muestras representativas de las características edafológicas del sur santafecino, República Argentina.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo pudo concluirse que en general los procedimientos considerados muestran una diversidad importante en el pronóstico de las humedades características.

Consecuentemente se debe considerar con precaución el empleo de las ecuaciones ya que dan resultados diversos para una misma caracterización físico-química de un suelo.

Entre los métodos empleados para la estimación de humedades de punto de marchitez permanente y capacidad de campo en la cuenca del A° Ludueña puede recomendarse las ecuaciones propuestas por Rawls *et al.* (1982).

Para la estimación de humedad residual y de saturación, empleadas como parámetros para las curvas de retención de humedad, puede considerarse el código Rosetta o bien la ecuación propuesta por Wösten *et al.* (1999).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acutis, M. and Donatelli, M. (2003) SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Europ. J. Agronomy* 18:p373-377.
- Arya, L.M., and J.F. Paris. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:218-227.
- Carsel, R. F., and R. S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24:755-769.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., and Ginn, T.R., 1984, A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682-690.
- Damiano F, Díaz R A, Grondona M O. 1996. Evaluación de una función uni-parámetrica 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. Publicado en Actas.
- Haverkamp, R., and J.Y. Parlange. 1986. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Sci.* 142:325-339.
- Hutson, J.L., Wagenet, R.J., 1992. LEACHM, Leaching Estimation And Chemistry Model. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences Research series no. 92.3. New York, Cornell University, p. 121.
- Leij, F. J., W. J. Alves, M. Th. van Genuchten, and J. R. Williams. 1996. Unsaturated Soil Hydraulic Database, UNSODA 1.0 User's Manual. Report EPA/600/R-96/095, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma. 103 pp.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. Estimating soil water properties. *Transactions, ASAE*, 25(5):1316-1320 and 1328.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p 293-299. In Jones, E.B. and T.J. Ward (ed.) *Watershed management in the eighties*. Proc. Irrig. Drain. div., ASCE, Denver, CO. April 30 - May 1. 1985.
- Rawls, W.J., L.R. Ahuja and D.L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. p 329-340. In M. Th. van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L.J. Lund (ed.). *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. Proc. Int Worksh. Riverside, CA. Oct 11-13. 1989. University of California, Riverside, CA.
- Schaap, M.G., Leij F.J., van Genuchten. M. Th., 1999. A bootstrap neural-network approach to predict soil hydraulic parameters. In: van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L. Wu (Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, University of California, Riverside, CA, pp. 1237-1250.
- Sharpley, A.N., and J.R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. USDA, Agricultural Research Service, Technical Bulletin No. 1768, Washington, D.C., USA.

- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick R.I., 1986, Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1031 -1036. *Geoderma*, 102, 275 -297.
- Vereecken, H., 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.
- Williams, R.D., L.R. Ahuja, and J.W. Naney. 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density, and limited data. *Soil Sci.* 153:172-184.
- Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169-185.
- Zimmermann E. 2003. Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 2. Estrategias para la Calibración". *Journal of Earth Sciences. Boletín Geológico y Minero de España*. ISSN 0366-0176. Vol 114. No 2: 159-169. Madrid. España.
- Zimmermann, E. 2006a. Funciones hidráulicas de suelos limosos: valores de referencia. In: XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Zimmermann E. 2006b. Estimación de funciones hidráulicas de suelos limosos. Valores de referencia y regresiones con parámetros físicos. *Cuadernos del CURIHAM*, UNR Editora. Rosario, v. 11, n. 1, p. 49-66, 2006.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2006. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones con propiedades físicas y granulométricas. In: XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2007. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán. Argentina.

