

Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos

Alberto Quiroga; Romina Fernández y Cristian Álvarez



Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos

Alberto Quiroga¹
Romina Fernández¹
Cristian Álvarez²

1 EEA INTA Anguil

2 AER General Pico



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación



Ministerio de Desarrollo Social
Presidencia de la Nación

Estación Experimental Agropecuaria Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"
Centro Regional La Pampa-San Luis
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Programa Nacional Agua

Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos / Alberto Raúl Quiroga ... [et al.] ; compilado por Alberto Raúl Quiroga ; Romina Fernández ; Cristián Álvarez ; prólogo de Alfredo Bono. - 1a ed. - Anguil, La Pampa : Ediciones INTA, 2018.
123 p. ; 28 x 20 cm.

ISBN 978-987-521-937-3

1. Suelos. 2. Análisis del Suelo. 3. Agua. I. Quiroga, Alberto Raúl II. Quiroga, Alberto Raúl, comp. III. Fernández, Romina, comp. IV. Álvarez, Cristián, comp. V. Bono, Alfredo, prolog.

CDD 631.4

Diseño Gráfico

Dis. Gráf. Francisco Etchart

Impresión

Gustavo J. Moyano

Impreso en los talleres gráficos de la EEA INTA Anguil

“Ing. Agr. Guillermo Covas”

Tirada de 500 ejemplares

Julio de 2018



EDICIONES INTA

Centro Regional La Pampa-San Luis

EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”

RN N°5 Km 580, CP 6326, Anguil, La Pampa, Argentina

PRÓLOGO

La provisión adecuada y suficiente de alimentos, energía y agua, serán los mayores desafíos de la humanidad en las próximas décadas. La demanda de alimentos se incrementará en el futuro, por lo que será necesario intensificar aún más la producción agrícola. Uno de los factores que tienen mayor influencia sobre la productividad de los cultivos es el agua, que en gran parte proviene de las lluvias, las que suelen ser insuficientes para los cultivos. Este libro procura interpretar y comprender cada aspecto del flujo del agua desde la caída como lluvia pasando a través del suelo hasta llegar a las plantas. Asimismo, incluye muchas interacciones del agua con las plantas, las raíces y el suelo, especialmente como afectan el rendimiento de los cultivos. En la actualidad muchos factores determinan los rendimientos de los principales cultivos agrícolas en la Argentina, los cuales se originan en cuestiones físicas. Las pérdidas de profundidad efectiva, materia orgánica, agua útil, son algunos de los problemas que vuelven críticos el desarrollo de los cultivos, a esto se suman las compactaciones subsuperficiales, la erosión y el encostramiento superficial. Todos los capítulos de este manual tratan sobre los problemas que de una u otra forma generan limitaciones en las propiedades físico-hídrica de los suelos, es decir, la

capacidad de los mismos para soportar el crecimiento de los cultivos. Son pocos los textos publicados en castellano que recopilan no sólo la información, sino también los conceptos básicos de la dinámica del agua sobre los sistemas de producción a partir del análisis y evaluación de indicadores físicos-hídricos de los suelos. Por lo tanto, esta publicación permite que el lector tenga una visión general y completa sobre esta temática. Los autores de los capítulos tienen larga trayectoria en cada uno de las especialidades que aquí se tratan. La gran mayoría de los resultados presentados han sido publicados previamente en revistas científicas nacionales e internacionales, y los autores son referentes en los temas desarrollados en cada capítulo. Esto, indudablemente garantiza la calidad de esta publicación. En síntesis, este manual resulta un importante aporte bibliográfico destinado, a estudiantes avanzados, de grado y posgrados, a docentes universitarios de agronomía y carreras afines, y a productores y profesionales de la actividad pública y privada.

Alfredo Bono

DEDICATORIA

A los técnicos de laboratorio y ayudantes de campo que con su trabajo, frecuentemente silencioso y anónimo, resultan claves en la generación de conocimiento. A todos ellos nuestro reconocimiento.

LISTA DE AUTORES

Silvia Aimar. Facultad de Agronomía. UNLPam

Cristian Álvarez. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural General Pico

José Andriani. Jubilado INTA. Estación Experimental Agropecuaria Oliveros

Daniel Buschiazzo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Patricia Carfagno. INTA. Instituto de Suelos. Centro de Investigación de Recursos Naturales

Juan Cruz Colazo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria San Luis

Juan Jose De Battista. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Concepción del Uruguay

Maximiliano Joaquín Eiza. INTA. Instituto de Suelos. Centro de Investigación de Recursos Naturales

Romina Fernández. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Ileana Frasier. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Franco Frolla. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave

Carolina Gaggioli. Facultad de Agronomía. UNLPam

Juan Alberto Galantini. CERZOS UNS-CONICET

Florencia Gómez. Estudiante de la facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPam

Perla Imbellone. Instituto de Geomorfología y Suelos - Centro de Investigaciones en Suelos y Agua de Uso Agropecuario. UNLP

Silvia Imhoff. CONICET-Universidad Nacional del Litoral

Hugo Krüger. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave

Mariano Méndez. Facultad de Agronomía. UNLPam

Elke Noellemeyer. Facultad de Agronomía. UNLPam

Agustín Oderiz. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Jorge de Orellana. Profesor emérito Universidad Nacional del Litoral

Miguel Pilatti. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral

Alberto Quiroga. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Eduardo de Sá Pereira. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Agencia de Extensión Rural Coronel Suarez

María Carolina Sasal. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Parana

Eric Scherger. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Mauricio Uhaldegaray. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil

Marcelo Wilson. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Parana

Josefina Zilio. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave

INDICE

1. Guía de descripción e interpretación de suelos hidromórficos Perla Imbellone	09
2. Perfil cultural: Un método para evaluar el estado de la estructura del suelo Juan J. De Battista, María Carolina Sasal y Marcelo Wilson	21
3. Medición de la infiltración en el suelo. Infiltrómetro de anillo simple y simulador de lluvias Maximiliano Eiza y Patricia Carfagno	25
4. Medición de la erosión eólica Juan Cruz Colazo, Mariano Méndez y Daniel Buschiazzo	37
5. Un indicador de compactación relacionado con el agua del suelo Hugo Krüger, Franco Frolla y Josefina Zilio	45
6. Constantes hídricas y retención de agua en el suelo José Andriani	51
7. Intervalo hídrico óptimo: Indicador de calidad física de los suelos Silvia Imhoff, Romina Fernández, Alberto Quiroga, Elke Noellemeyer, Miguel Pilatti y Jorge de Orellana	63
8. Estabilidad de agregados del suelo Josefina Zilio, Silvia Aimar, Hugo Krüger y Franco Frolla	73
9. Propuesta de indicadores a fin de evaluar cambios en la porosidad y compactación de los suelos Romina Fernández, Alberto Quiroga, Ileana Frasier, Agustín Oderiz, Mauricio Uhaldegaray, Cristian Álvarez, Eric Scherger y Elke Noellemeyer	83
10. Contribución a la evaluación de un recurso clave en la sustentabilidad de los suelos. Abundancia y distribución de raíces Ileana Frasier, Romina Fernández, María Gómez, Carolina Gaggioli, Cristian Alvarez, Agustín Oderiz, Mauricio Uhaldegaray, Eric Scherger, Elke Noellemeyer y Alberto Quiroga	95
11. Consumo de agua de los cultivos. Coeficiente de cultivo y evapotranspiración de referencia como indicadores en el cálculo del consumo de agua José Andriani	103
12. Costo hídrico de la captura de carbono por los cultivos de cobertura; aspectos cualitativos y cuantitativos Eduardo de Sá Pereira y Juan Alberto Galantini	113

**Silvia Imhoff, Romina Fernández,
Alberto Quiroga, Elke Noellemeyer,
Miguel Pilatti y Jorge de Orellana**

7

Intervalo hídrico óptimo: Indicador de calidad física de los suelos

La evaluación de la calidad del suelo debería incluir la influencia de las propiedades intrínsecas y dinámicas del suelo, así como los procesos que tienen el potencial de limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los procesos biológicos en las plantas son condicionados, entre otros factores, por el contenido de agua en el suelo. En general las tasas máximas de ocurrencia de los procesos biológicos coinciden con un umbral (o rango) óptimo de humedad, por encima o por debajo del cual dichas tasas resultan disminuidas. Cuando el contenido de agua en el suelo es reducido, las tasas son limitadas por la disponibilidad de agua, la resistencia del suelo a la penetración de las raíces (RP) y la accesibilidad a los nutrientes. Cuando el contenido de agua en el suelo es elevado, las tasas son generalmente limitadas por aireación inadecuada. Por lo tanto, dos indicadores son de gran relevancia para identificar la calidad física de los suelos: la capacidad para almacenar agua entre lluvias y/o riego y la RP (Orellana et al., 1997).

Según Letey (1985), la disponibilidad de agua y oxígeno, la RP y la temperatura del suelo son las propiedades que afectan directamente el crecimiento de las raíces y, por lo tanto, de las plantas al condicionar diversos procesos metabólicos. La búsqueda de un índice de calidad física del suelo que integre los efectos de las propiedades mencionadas no es reciente. Eavis (1972) demostró que la variación de la densidad del suelo y de la humedad afectaron el crecimiento de plantas de *Pisum sativum* L. El autor sugirió que los efectos negativos fueron determinados por la ocurrencia de déficit hídrico, aireación inadecuada, excesiva RP o por la combinación de estos factores. Phene & Beale (1976) definieron un rango ideal de ten-

sión de agua en el suelo para el crecimiento de plantas, aplicando irrigación con elevada frecuencia para mantener el potencial mátrico dentro de determinados rangos. Los autores demostraron que existe un valor de potencial mátrico a partir del cual la falta de aireación se torna limitante y que coincide con una tasa de difusión de oxígeno menor a $0,4 \text{ g cm}^{-2}\text{min}^{-1}$. Por otro lado, identificaron un valor de potencial mátrico a partir del cual RP se torna limitante cuando el suelo se seca, siendo dicho valor de 2 MPa. Además, observaron que a medida que la densidad del suelo (D_s) aumentaba, el rango ideal de tensión de agua para el crecimiento de plantas disminuía. Los estudios de Eavis (1972) y Phene & Beale (1976) definieron los fundamentos de lo que vendría a ser el indicador llamado Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). Sin embargo, la primera descripción cualitativa de este concepto fue realizada por Letey (1985), quien adoptó la humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente como límites críticos de potencial mátrico para el crecimiento de las plantas, pero además destacó que aun estando dentro de dichos límites, es decir dentro del rango de agua disponible, las plantas podían sufrir estrés por elevada RP o falta de oxígeno. Pilatti & Orellana (1993) presentaron la idea del IHO definiéndolo como "el contenido hídrico del suelo tal que las raíces de las plantas superiores puedan respirar, absorber agua y expandirse sin restricciones que afecten su crecimiento". Estos autores propusieron utilizar el rango de agua fácilmente utilizable, en vez del rango de agua disponible, como límites del IHO. La caracterización y cuantificación del IHO incluyendo la densidad del suelo como variable independiente fue propuesta por Silva et al. (1994)

que denominaron al indicador Least Limiting Water Range (LLWR); luego fue traducido al español y portugués como IHO.

Silva et al. (1994) definieron el IHO como el rango de humedad en el suelo determinado por un límite superior y uno inferior de contenido hídrico dentro del cual la disponibilidad de agua y oxígeno y la resistencia mecánica no limitan el crecimiento de las raíces para un determinado valor de D_s . A medida que los suelos se vuelven más densos, el IHO se hace más estrecho, siendo la aireación la propiedad limitante en el extremo húmedo y la resistencia mecánica en el extremo seco. El IHO varía con la textura, mineralogía y contenido de materia orgánica del suelo, variables que interactúan para definir los efectos del contenido de agua del suelo en muchos procesos biológicos (Silva & Kay, 1997a). Existen evidencias experimentales indicando que las raíces envían señales inhibitorias a las hojas, promoviendo el cierre de los estomas y la reducción de la tasa fotosintética cuando el suelo presenta condiciones inadecuadas para su crecimiento. Estas señales, de naturaleza bioquímica, son liberadas por las raíces directamente en la corriente transpiratoria, como por ejemplo el ácido abscísico (Ismail & Davies, 1998; Passioura, 1991; Hurley & Rowarth, 1999). El aumento de la RP, asociado con el secado del suelo o con el incremento de la D_s , parece controlar los mecanismos de emisión de estos compuestos químicos. Así, el crecimiento de la parte aérea de las plantas se reduce cuando las condiciones físicas del suelo son adversas para el crecimiento de las raíces.

La cuantificación exacta del valor de RP que afecta el crecimiento de las raíces es difícil de establecer debido a los mecanismos biológicos que controlan dicho proceso y que establecen las diferencias entre una raíz y un penetrómetro. A pesar de ello, diversos estudios establecen correlaciones negativas entre el crecimiento de las raíces y la RP (Bengough & MacKenzie, 1994; Weaich et al., 1996; Pabin et al., 1998; Merotto & Mundstock, 1999). En términos generalizados, se asume el valor de 2 MPa (Taylor et al., 1966; Materechera et al., 1991; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998) como límite a partir del cual la RP comienza a afectar negativamente el crecimiento de las plantas, pudiendo causar reducciones severas en el rendimiento.

Varios trabajos han mostrado que el IHO se correlacionó con la tasa de crecimiento de la parte aérea de maíz (Silva & Kay, 1996), con el crecimiento de las raíces (Benjamin et al., 2013; Siegel-Issem et al., 2005) y producción de diversos cultivos (Sharma & Bhushan, 2001; Lapen et al., 2004; Alesso et al., 2011). La disminución del IHO significa que la probabilidad de que las plantas sufran condiciones de estrés aumenta notablemente (Silva & Kay, 1997b). Pilatti et al. (2008) presentaron una propuesta para evaluar la calidad del suelo para el crecimiento de los cultivos por medio del IHO. Generalmente el IHO se reduce cuando la D_s aumenta debido al pisoteo de animales o al tránsito de la maquinaria, especialmente con suelo húmedo (Imhoff et al., 2016). La densificación del suelo también puede ocurrir por la consolidación natural que se produce durante el secado de suelos, especialmente cuando son estructuralmente inestables debido al reducido contenido de materia orgánica y/o al tipo de minerales que lo constituyen, lo que también afecta la amplitud del IHO (Betz et al., 1998; Tormena et al., 1999; Chen et al., 2014). El IHO también resultó eficaz para identificar los factores que afectan ciertos procesos microbianos, como la mineralización neta de nitrógeno o las emisiones de CO_2 (Medeiros et al., 2011; Drury et al., 2003). Más recientemente, el LLWR fue combinado con el modelo SoilFlex para predecir los cambios en el IHO debido a la compactación causada por la maquinaria agrícola (Keller et al., 2015).

En Argentina, el IHO ha sido evaluado en suelos de la región pampeana llana y ondulada como indicador de su calidad física con resultados promisorios. Este indicador fue suficientemente sensible para detectar diferencias entre horizontes, entre sistemas de manejo y para separar zonas homogéneas diferentes dentro de lotes sometidos al mismo manejo, contribuyendo así a facilitar el empleo de agricultura de precisión (Imhoff et al., 2006; Pilatti et al., 2008; Zen et al., 2009; Miretti et al., 2010; Damiano & Moschini, 2011; Pilatti & Orellana, 2012; Pilatti et al., 2012; Mengoni et al., 2013; Imhoff et al., 2016; Mengoni et al., 2016). El IHO también fue evaluado en Molisoles y Vertisoles de la provincia de Entre Ríos por Wilson et al. (2013). Recientemente este indicador ha sido utilizado para valorar cambios en la calidad del suelo

influenciados por el uso en la Región Semiárida Pampeana (Fernández et al., 2017).

La textura, el contenido de carbono y el contenido de agua al momento de realizar el manejo son los factores que más afectan la degradación física de suelos Argiudoles y Haplustoles y, como resultado, el IHO (Imhoff et al., 2016, Fernández et al., 2017). Similar conclusión se extrae del trabajo de Fernández et al. (2017), lo que indica que los mismos factores condicionan el valor del IHO a pesar de las diferencias entre los suelos. Dado que la textura del suelo sólo se altera bajo condiciones extremas (ej. erosión), para aumentar la magnitud del IHO deberá recurrirse a prácticas de manejo que permitan reducir el estado de compactación del suelo. Estas alternativas de manejo incluyen el uso de sistemas de labranza que permitan aumentar la porosidad de aireación, el tránsito controlado de la maquinaria agrícola para evitar la compactación generalizada de los lotes, el control de peso de la maquinaria y equipos de transporte así como el control de la presión de los neumáticos. Evitar el laboreo del suelo y el pisoteo con animales o equipos de transporte con humedad no adecuada, aumentar el contenido de materia orgánica del suelo realizando rotaciones adecuadas de cultivos, introduciendo cultivos de cobertura o aplicando abonos orgánicos.

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL IHO

Para la determinación del IHO se debe obtener la curva de retención hídrica del suelo mediante mesa de tensión y/o ollas de presión similares al sistema Richard (Klute, 1986). Además se requiere la obtención de la curva de resistencia a la penetración (Silva et al., 1994) y D_s para cada muestra. Uno de los pasos más importantes es la recolección de muestras que debe capturar la máxima variación de las condiciones estructurales del suelo, expresada por la D_s (Silva et al., 2015). Una vez que las relaciones funcionales se han definido, el cálculo de IHO se lleva a cabo para cada muestra de suelo con base en la D_s medida.

Para elaborar las curvas se deben extraer muestras de suelo sin disturbar, por ejemplo con cilindros de metal, en los estratos en que se quiere determinar el IHO. Las muestras se deben saturar lentamente por capilaridad y luego equilibrar en potenciales mátricos decrecientes, tales como:

-5, -10, -33, -100, -500 y -1500 kPa. Para la determinación del contenido de agua en -5 y -10 kPa se puede utilizar una mesa de tensión. Esta mesa puede ser construida con un recipiente no deformable en el que se colocan capas sucesivas (aproximadamente de 2 cm) de: piedras redondeadas menores a 1 cm, arena de 250 μm , arena de 100 μm y arena menor a 75 μm , sobre las cuales se colocan los cilindros. Para la determinación del contenido de agua a -33, -100, -500 y -1500 kPa se utilizan ollas de baja y alta presión que contienen placas de cerámica sobre las que se apoyan los cilindros. Para la determinación del contenido de humedad a -1500 kPa también se pueden utilizar muestras disturbadas, tamizadas por 2 mm. Una vez alcanzado el equilibrio, las muestras son pesadas y en cada una se mide RP con penetrómetro de laboratorio que posee un cono de 60° de ángulo y 0,4 cm de diámetro basal para muestras de 5 cm de diámetro. El tamaño del cono debe mantener una relación mínima con el diámetro de la muestra: diámetro del cono de 100:1 para evitar influencia de las paredes del cilindro sobre la medición de RP. Posteriormente las muestras se secan en estufa a 105°C hasta peso constante a fin de determinar el contenido de agua a cada potencial mátrico de la curva de retención hídrica y la D_s (Blacke & Hartge, 1986).

Para determinar el IHO es necesario determinar para cada muestra cuatro valores de contenido hídrico (Silva et al., 1994):

- 1)** Contenido de agua a capacidad de campo (CC= -33 kPa) (CHcc). Se obtiene de la curva de retención de agua del suelo.
- 2)** Contenido de agua en el punto de marchitez permanente (PMP= -1500 kPa) (CHpmp). Se obtiene de la curva de retención de agua del suelo.
- 3)** Contenido de agua en el cual el valor de RP es 2MPa (CHrp=2). Se obtiene de la curva de resistencia a la penetración.
- 4)** Contenido de agua en el suelo que deja con aire el 10 % de los poros (CHpa). Se obtiene restando 0,1 a la porosidad total del suelo.

Los valores de los contenidos hídricos pueden obtenerse también a partir de expresiones matemáticas denominadas funciones de edafotransferencia que permiten calcular ciertas variables a partir de diferentes propiedades de los suelos

(Bouma & Van Lanen, 1987). El ajuste de la curva de retención por medio del procedimiento descrito por Silva et al. (1994) permite incorporar la Ds medida en cada muestra en la estimación de los valores de humedad del suelo necesarios para cuantificar el IHO. Dicho procedimiento utiliza la ecuación 1 mediante un algoritmo simplificado desarrollado en hoja de cálculo Excel por Leão & Silva (2004) para estimar CHcc y CHpmp.

Ecuación 1:

$$\theta = \exp(d + e \cdot D_s) \cdot (\Psi)^f$$

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

Ds: densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

Ψ : potencial (kPa).

d, e, f: son los parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica del suelo

La resistencia a la penetración es influenciada por la Ds y el contenido de agua del suelo (θ). Por esta razón la relación funcional entre RP, Ds y θ es identificada como curva de RP del suelo. Un modelo no lineal de ajuste para dicha curva fue propuesto por Busscher (1990) y adoptado por Silva et al. (1994) para el cálculo del IHO. Para determinar el contenido hídrico del suelo en el que se alcanza un valor de RP de 2 MPa, considerado restrictivo para el crecimiento de las raíces (Taylor et al., 1966), se puede utilizar la ecuación 2.

Ecuación 2:

$$RP = a \theta^b D_s^c$$

$$\theta = (RP / (a \cdot D_s^c))^{1/b}$$

RP: resistencia a la penetración (MPa).

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

Ds: densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).

a, b, c son los parámetros de ajustes de la curva de resistencia a la penetración.

El contenido hídrico del suelo que corresponde a 10 % de porosidad de aireación, considerado adecuado para los cultivos, se puede determinar por medio de la ecuación 3.

Ecuación 3:

$$\theta_{pa} = [(1 - D_s / D_p) - 0,10]$$

Ds: densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

Dp: densidad de las partículas (g cm^{-3}); se asume Dp= 2,65 g cm^{-3} en caso de no contar con el valor medido.

El IHO se calcula, según la metodología propuesta por Silva et al. (1994), a partir de la diferencia entre el límite superior, definido como el menor valor entre CHcc y CHpa, y el límite inferior, definido como el mayor valor entre CHpmp y CHRp, para cada valor de Ds medida. Según lo descrito por Wu et al. (2003) hay cuatro posibilidades que determinan el IHO:

1) Si, $CH_{pa} \geq CH_{cc}$ y $CH_{rp} \leq CH_{pmp}$

$$IHO = CH_{cc} - CH_{pmp}$$

2) Si, $CH_{pa} \geq CH_{cc}$ y $CH_{rp} \geq CH_{pmp}$

$$IHO = CH_{cc} - CH_{rp}$$

3) Si, $CH_{pa} \leq CH_{cc}$ y $CH_{rp} \leq CH_{pmp}$

$$IHO = CH_{pa} - CH_{pmp}$$

4) Si, $CH_{pa} \leq CH_{cc}$ y $CH_{rp} \geq CH_{pmp}$

$$IHO = CH_{pa} - CH_{rp}$$

El IHO se hace igual a cero ($IHO=0$) cuando los valores de contenido de agua en el extremo húmedo y seco son numéricamente iguales. El valor de Ds cuando el $IHO=0 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ se denomina densidad del suelo crítica (Dsc) (Silva et al., 1994). Valores superiores a la Dsc resultan en un entorno físico inadecuado para el desarrollo del sistema radicular de la planta. Los valores de CHcc, CHpmp y CHRp también se pueden estimar a partir de las funciones de edafotransferencia (Silva & Kay, 1997a; Damiano & Taboada, 2000; Imhoff et al., 2016).

El concepto de agua disponible para las plantas (AD), definido como la diferencia entre CHcc-CHpmp, se centra estrictamente en la relación funcional entre el contenido de agua y el potencial mátrico del suelo. Sin embargo, a medida que disminuye la tasa de difusión de oxígeno en el suelo, el crecimiento de las raíces puede disminuir por falta de aireación adecuada del suelo. En esta situación, es necesario que el suelo se seque para alcanzar un nivel de difusión de oxígeno adecuado para el crecimiento de las raíces. De manera similar, en suelos secos, la RP del suelo puede alcanzar el valor crítico de 2 MPa antes de que el contenido hídrico alcance el valor de punto de marchitamiento permanente. En esta situación aunque en el suelo exista AD las raíces no serán capaz de crecer.

Las Figuras 1 y 2 ilustran el IHO para un suelo Argiudol típico, serie Santa Isabel de la provincia de Santa Fe (Fig. 1) y para un Paleustol petrocálcico.

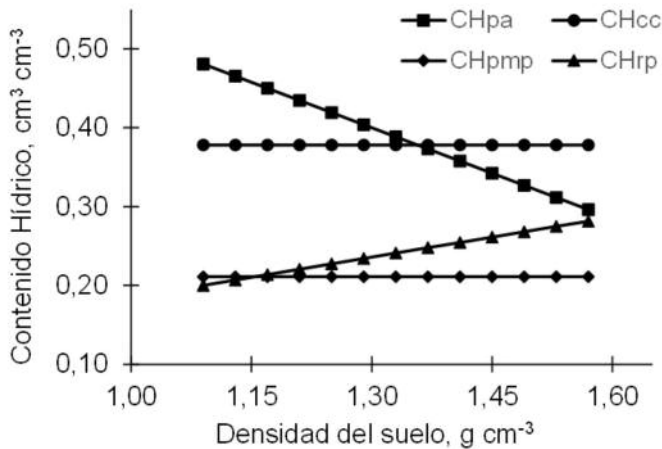


Figura 1. Ilustración del Intervalo Hídrico Óptimo para un Argiudol típico, serie Santa Isabel, con los respectivos límites de contenido hídrico correspondientes a capacidad de campo (CHcc), punto de marchitamiento permanente (CHpmp), porosidad de aireación mínima de 10% (CHpa) y resistencia a la penetración de las raíces de 2MPa (CHrp).

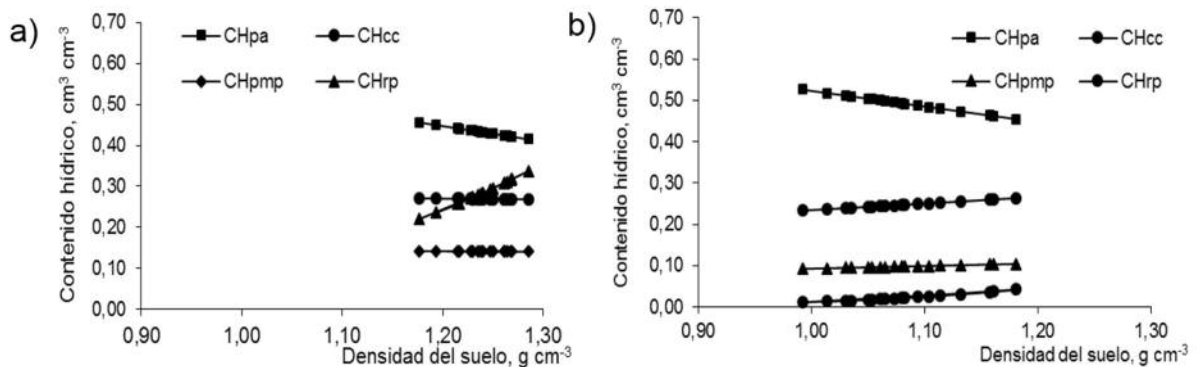


Figura 2: Ilustración del Intervalo Hídrico Óptimo para un Paleustol petrocálcico, con los respectivos límites de contenido hídrico correspondientes a capacidad de campo (CHcc), punto de marchitamiento permanente (CHpmp), porosidad de aireación mínima de 10% (CHpa) y resistencia a la penetración de las raíces de 2MPa (CHrp), a) bajo uso agrícola y b) bajo uso en vegetación natural. Adaptado de Fernández et al. (2017).

co de la provincia de La Pampa (Fig. 2).

En la Figura 1 se observa que CHpa sustituye CHcc cuando el valor de $D_s=1,36 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que CHrp sustituye CHpmp cuando el valor de $D_s=1,17 \text{ g cm}^{-3}$. El valor máximo del IHO coincide con el AD cuando los valores de $D_s < 1,17 \text{ g cm}^{-3}$. Cuando el IHO=0, $D_{sc}=1,58 \text{ g cm}^{-3}$. A este valor de D_{sc} el crecimiento de las plantas será restringido por aireación inadecuada y excesiva RP del suelo aunque en el suelo exista AD, la productividad de los cultivos será afectada.

En el Paleustol petrocálcico de la provincia de La Pampa bajo uso agrícola se encontró que a medida que D_s aumenta, CHpa disminuye y CHrp aumenta, mientras que CHcc y CHpmp se mantienen relativamente constantes. Por lo tanto el IHO disminuye con el aumento de D_s , siendo el IHO=0

cuando $D_s=1,22 \text{ g cm}^{-3}$ (D_{sc}) (Fig. 2 a). En el mismo suelo pero bajo vegetación natural a medida que D_s aumenta, CHpa disminuye y CHrp aumenta, mientras que CHcc y CHpmp se incrementan muy suavemente. El límite superior del IHO fue determinado por CHcc y el límite inferior por CHpmp en todo el rango de D_s medidas, siendo igual al valor de AD. En esta situación no se encontró un valor de D_{sc} (Fig. 2 b) a partir del cual la productividad de los cultivos sea limitada.

Pilatti & Orellana (2012) evaluaron la calidad física de Argiudoles bajo vegetación natural y obtuvieron valores del IHO de $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Además indicaron que los suelos en esa condición natural, con mayores contenidos de materia orgánica con respecto a situaciones agrícolas, ofrecen buen estado físico para el establecimiento, explo-

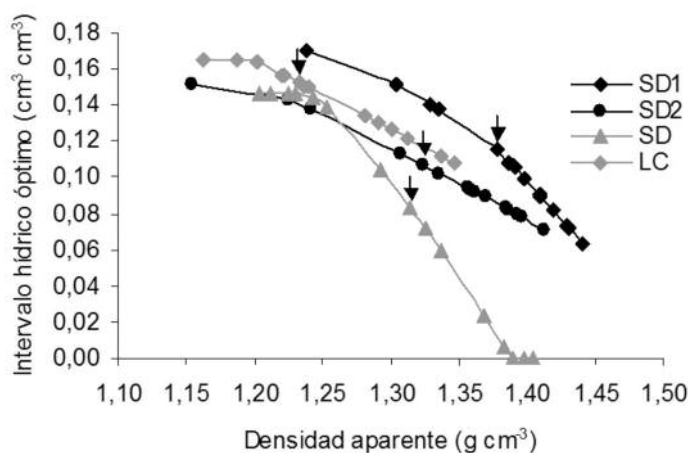


Figura 3. Intervalo hídrico óptimo de los distintos tratamientos. SD1=siembra directa, maíz-soja-trigo-soja. SD2=siembra directa, trigo-soja. LC=labranza convencional, trigo-soja. SD=siembra directa, maíz-trigo-soja-soja. SD1 y SD2 en la localidad de Videla. LC y SD en Gálvez. Las flechas indican la densidad promedio del tratamiento.

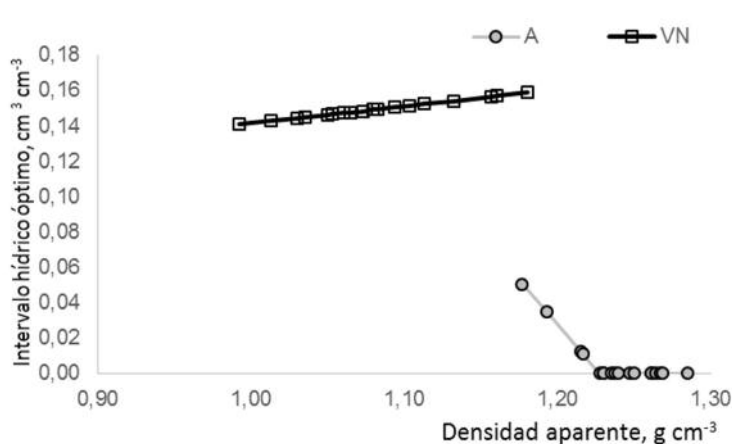


Figura 4: Intervalo hídrico óptimo bajo uso en vegetación natural (VN) y agrícola (A), en Palesutoles de la región semiárida pampeana.

ración y actividad radical. Los resultados del estudio de Fernández et al. (2017) demuestran que también en Paleustoles de la Región Semiárida Pampeana bajo vegetación natural fue posible alcanzar valores de IHO similares a los hallados en la Región Húmeda Pampeana con granulometrías más finas.

En suelos de similar textura, a mayor contenido de carbono, mayor es el valor del IHO. Este indicador refleja, el efecto que tiene el sistema de labranza sobre el contenido de materia orgánica y la densificación de los suelos, como se observa en la Figura 3 para Argiudoles del centro de Santa Fe (Imhoff et al., 2006) y en la Figura 4 para un Paleustol petrocálcico de La Pampa (Fernández et al., 2017). El suelo bajo uso en vegetación natural con mayor contenido de carbono orgánico con respecto al uso agrícola, presentó similar IHO a mayor de densidad aparente, además los valores del IHO fueron superiores a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indicando una muy buena condición física del suelo. En cambio el suelo bajo uso agrícola, con menor con-

tenido de carbono orgánico, presentó un IHO considerablemente más bajo con respecto al uso en vegetación natural, e inferior al considerado adecuado ($>0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y rápidamente se alcanza la densidad aparente crítica (D_{sc} : $1,22 \text{ g cm}^{-3}$) (Fig. 4).

El rendimiento y estabilidad de los cultivos en suelos de reducido IHO estará muy condicionado por la distribución y cantidad de las precipitaciones durante el ciclo. El crecimiento y el desarrollo de los cultivos no resulta afectado si la humedad del suelo se mantiene dentro de los límites del IHO; lo contrario ocurre si la humedad se mantiene fuera del IHO. Miretti et al. (2012) estudiaron el comportamiento del cultivo de alfalfa dentro y fuera de manchones de un Argiudol que mostraron tener diferente IHO (Fig. 5 y 6). Los autores demostraron que la producción de materia seca y la persistencia de alfalfares se ve afectada por el número de días en que las plantas de alfalfa permanecieron en condiciones de humedad fuera del IHO (Fig. 7).

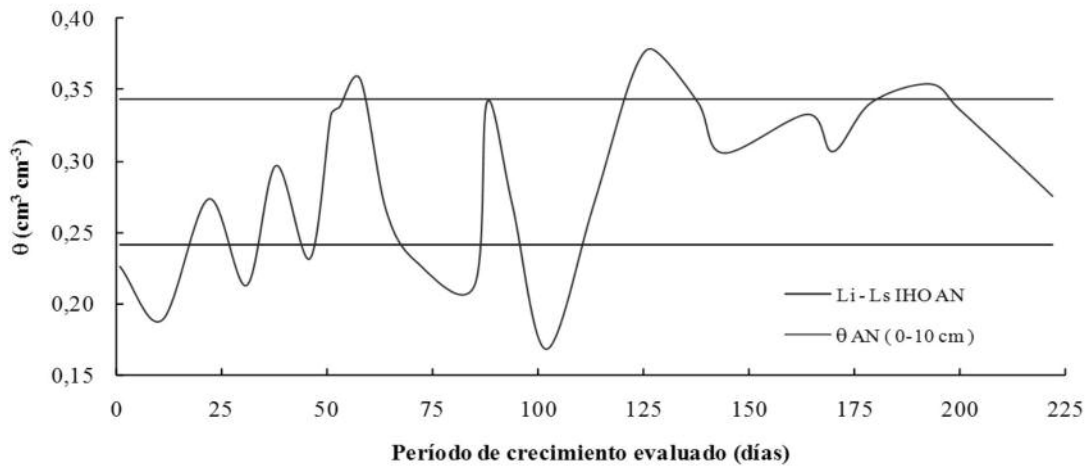


Figura 5. Contenido hídrico en el suelo (θ) durante el período evaluado de crecimiento de la alfalfa (222 días a partir del 31/10/2006) en relación al valor promedio del IHO en áreas normales (AN) de la pastura para la profundidad de 15 cm. Li=Límite inferior; Ls=Límite superior. IHO= Intervalo hídrico óptimo.

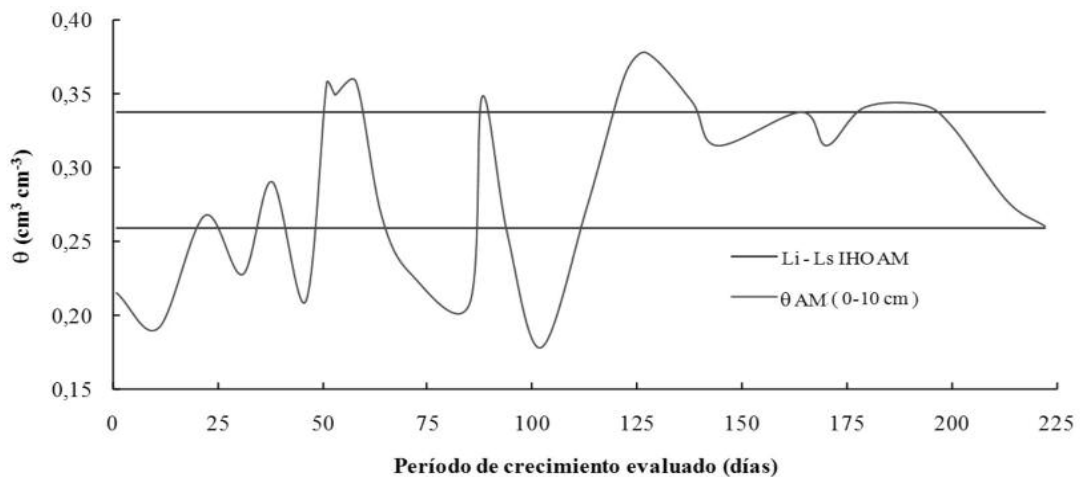


Figura 6. Contenido hídrico en el suelo (θ) durante el período evaluado de crecimiento de la alfalfa (222 días a partir del 31/10/2006) en relación al IHO promedio (profundidad: 0-15 cm) en manchones (AM) de la pastura. Li=Límite inferior; Ls=Límite superior. IHO= Intervalo hídrico óptimo.

Por lo tanto, en zonas húmedas y con precipitaciones frecuentes la probabilidad de que los cultivos sufran estrés es notablemente menor que en regiones semiáridas o con precipitaciones concentradas en ciertas épocas del año. Otro factor que condiciona la respuesta de los cultivos es la textura del suelo. En general, para una misma condición climática, por ejemplo exceso hídrico, un cultivo que crece en un suelo de textura fina será más proclive a sufrir estrés por falta de oxígeno que si crece en un suelo de textura gruesa. Frente a condiciones de déficit hídrico, un cultivo que crece en un suelo de textura fina podría sufrir estrés por elevada resistencia mecánica, mientras

que el que crece en un suelo de textura gruesa podría sufrir estrés por falta de agua, porque el suelo alcanzará más rápidamente el punto de marchitez permanente. Sin embargo es importante tener en cuenta que el contenido de materia orgánica condiciona la amplitud del IHO al modificar principalmente la curva de retención de agua del suelo (Silva & Kay, 1997 a; Imhoff et al., 2016). Imhoff et al. (2016) determinaron funciones de edafotransferencia para calcular el IHO para los principales suelos productivos de la provincia de Santa Fe que muestran el efecto de la granulometría y contenido de materia orgánica en la amplitud del IHO. También cuantificaron diversos indi-

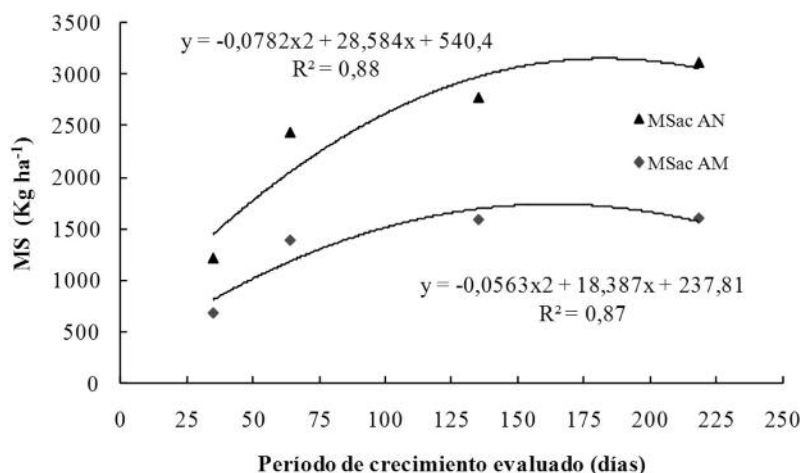


Figura 7. Producción de materia seca acumulada de alfalfa (MS kg ha⁻¹) durante el período de tiempo evaluado para la pastura de alfalfa en las áreas normales (AN) y manchones (AM).

cadres de compactación, como la presión de pre-consolidación (máxima presión que puede ser aplicada al suelo sin causar compactación adicional) y la susceptibilidad a la compactación, y establecieron relaciones funcionales entre el IHO y dichos indicadores. Esas funciones matemáticas permiten calcular, por ejemplo, la presión máxima a aplicar con la maquinaria agrícola sobre el suelo para no reducir el IHO o para no superar el valor de Dsc, por ejemplo. Estudios semejantes aún deben desarrollarse para suelos de otras regiones de Argentina.

CONCLUSIONES

Entre las cualidades del IHO para cuantificar la calidad física del suelo se pueden mencionar:

- Integra cuatro propiedades del suelo (aireación, capacidad de campo, resistencia mecánica del suelo y punto de marchitamiento permanente) en una sola variable, por lo que es un indicador muy útil de la calidad del suelo para el crecimiento de los cultivos.
- Es un indicador de la calidad física del suelo, siendo útil para comparar horizontes y diversos suelos.
- Proporciona una medida indicativa de los efectos del manejo sobre la estructura del suelo.
- Puede combinarse con la variación temporal del contenido de agua en el suelo para indicar la frecuencia con la que un cultivo puede sufrir estrés inducido por las condiciones físicas del suelo en asociación con las condiciones hídricas predominantes. Esto es crucial en cultivos de secano. En cultivos bajo riego, esta información también es útil para optimizar la programación del riego, de

forma de mantener el suelo con el contenido de agua adecuado para el desarrollo del cultivo.

- El IHO combinado con modelos de compactación puede servir para estimar el impacto de alterar las condiciones físicas del suelo sobre el crecimiento de raíces.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, A; S Imhoff; M Pilatti & Turino. 2011. Relación entre intervalo hídrico óptimo – rendimiento de soja y maíz. Brasil. Vicoso. 2011. Libro. Resumen. Congreso. XXXIII Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo.
- Bengough, A & B Mckenzie. 1994. Simultaneous measurement of root force and elongation for seedling pea roots. J. Exp. Botany, 45: 95-102.
- Benjamin, J; D Nielsen; M Vigil; M Mikha & F Calderon. 2013. A comparison of two models to evaluate soil physical property effects on corn root growth. Agron. J. 105: 713–720.
- Betz, C; R Allmaras; S Copeland & G Randall. 1998. Least limiting water range: Traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 1384–1393.
- Blacke, G & K Hartge. 1986. Bulk density. En: Methods of Soil Analysis-Physical and Mineralogical Methods 2nd ed. (Ed. Klute, A) Am. Soc. Agron. Madison, USA, p. 363-375.
- Bouma, J & H Van Lanen. 1987. Transfer functions and threshold values from soil characteristics to land qualities. In: Quantified land evaluation, ProcWorkshop ISSS/SSSA, Washington, DC. ITC Publ., Enschede, the Netherlands. pp. 106-111.
- Busscher, W. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water-content. Transactions of the Asae, v. 33: 519-524.

- Chen, G; R Weil & R Hill. 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Till. Res.* 136: 61–69.
- Damiano, F & R Moschini. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos Argiudoles plantados con *Eucalyptus dunii* Maiden. *Ciencia del Suelo* 29: 1-11.
- Damiano, F & M Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.
- Drury, C; T Zhang & B Kay. 2003. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1388–1404.
- Eavis, B. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth: I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture level in a sandy loam soil. *Plant Soil* 36: 613-622.
- Fernández, R; A Quiroga; C Lobartini & E Noellemeyer. 2017. Determinación del intervalo hídrico óptimo en Ustoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia del Suelo* 35: 215-227.
- Hurley, M & J Rowarth. 1999. Resistance to root growth and changes in the concentrations of ABA within the root and xylem sap during root-restriction stress. *J. Exp. Botany*, 50: 799-804.
- Imhoff, S; J Gay; A Grioni & P Ghiberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del Intervalo Hídrico Óptimo. 2006. Resúmenes de XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. - I Reunión de Suelos de la Región Andina. Artículo en Congreso. SACS.
- Imhoff, S; A Silva; P Ghiberto; C Tormena; M Pilatti & P Libardi. 2016. Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *PLOS ONE*. San Francisco: Public Library Science. ISSN 1932-6203.
- Ismail, M & W Davies. 1998. Root restriction affects leaf growth and stomatal response: the role of xylem sap ABA. *Sci. Hortic.*, 74: 257-268.
- Keller, T; A Silva; C Tormena; N Giarola; K Cavalieri; M Stettler & J Arvidsson. 2015. SoilFlex-LLWR: Linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. *Soil Use Manage.* 31: 321-329.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 635-662.
- Lapen, D; G Topp; E Gregorich & W Curnoe. 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.* 78: 151-170.
- Leão, T & A Da Silva. 2004. A simplified Excel((R)) algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Scientia Agricola* 61: 649–654.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Materechera, S; A Dexter & A Alston. 1991. Penetration of very strong soils by seeding of different plant species. *Plant Soil* 135: 31-41.
- Medeiros, J; A Silva; C Cerri; N Giarola; G Figueiredo & F Fracetto. 2011. Linking physical quality and CO2 emissions under long-term no-till and conventional till in a subtropical soil in Brazil. *Plant Soil* 338: 5-15.
- Mengoni, H; D Cosentino; C Álvarez; M Taboada; S Imhoff & A Quiroga. 2013. Intervalo hídrico óptimo de suelos de la región pampeana parte I: Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos. AACS e Instituto de suelos de Castelar.
- Mengoni, H; P Fernandez; D Cosentino; C Alvarez; M Taboada & S Imhoff. 2016. Relación entre resistencia mecánica a la penetración y contenido hídrico en suelos de la pampa ondulada. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto.
- Merotto, A & C Mundstock. 1999. Wheat root growth as affected by soil strength. *Rev. Bras. Ci. Solo* 23:197-202.
- Miretti, M; S Imhoff; R Marano & A Silva. 2012. Desarrollo de la alfalfa en ambientes con y sin manchones. Mar del Plata. Libro. Artículo Breve. Congreso. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo / 1ª edición. AACS.
- Miretti, M; S Imhoff; A Silva & S Lavado. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields in Santa Fe. *Scientia Agricola* 67: 604-610.
- Orellana, J; M Pilatti & D Grenón. 1997. Soil Quality: An approach to the physical state assessment. *J. Sust. Agric.* 9: 91-108.
- Pabin, J; J Lipiec S Włodek; A Biskupski & A Kaus. 1998. Critical soil bulk density and strength for pea seedling growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.* 46: 203-208.
- Passioura, J. 1991. Soil structure and plant growth. *Aust. J. Soil Res.*, 29: 717-728.
- Phene, C & W Beale. 1976. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 430-436.
- Pilatti, M; S Imhoff & J Orellana. 2008. Propuesta de interpretación del IHO para evaluar calidad del suelo. Resúmenes de XXI Congreso Argentino de la Ciencia

del Suelo. AACR.

- Pilatti, M & J Orellana. 1993. Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El Intervalo Hídrico Óptimo. Actas XIV Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo, pp. 21-22. Mendoza.
- Pilatti, M & J Orellana. 2012. Suelos ideales para agricultura sostenible. Revista FAVE 11: 65-88.
- Pilatti, M; J Orellana; S Imhoff & A Silva. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. Ciencia del Suelo 30: 9-21.
- Sharma, P & L Bhushan. 2001. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. Soil Till. Res. 60: 143-152.
- Siegel-Issem, C; J Burger; R Powers; F Ponder & S Patterson. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 215-226.
- Silva, A & B Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. Plant Soil 184: 323-329.
- Silva, A & B Kay. 1997a. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 877-883.
- Silva A & B Kay. 1997b. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 884-888.
- Silva, A; B Kay & E Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1775-1781.
- Silva, A; B Kay; C Tormena; S Imhoff; D Karlen; J Benjamin & R Lal. 2015. Least Limiting Water Range of Soils. Encyclopedia of Soil Science, 3ra Ed. Three Volume Set: CRC Press. ISBN 9781498738903.
- Taylor, H; G Roberson & J Parker. 1966. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. Soil Sci. 102: 18-22.
- Tormena, C; A Silva & P Libardi. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo 22: 573-581.
- Tormena, C; A Silva & P Libardi. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the limiting water range approach. Soil Till. Res 52: 223-232.
- Weaich, K; A Cass & K Bristow. 1996. Pre-emergent shoot growth of maize (*Zea mays* L.) as a function of soil strength. Soil Till. Res. 40: 3-23.
- Wilson, M; M Sasal & O Caviglia. 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. Geoderma

192: 354-361.

- Wu, L; G Feng; J Letey; L Ferguson; J Mitchell; B Mccullough-Sanden & G Markegard. 2003. Soil management effects on the nonlimiting water range. Geoderma 114: 401-414.
 - Zen, O; S Imhoff; S Gambaudo; H Fontanetto & R Martel. 2009. Identificación de ambientes homogéneos de manejo mediante indicadores de calidad física y química de suelos. Jornada Nacional de Agricultura de Precisión: integrando tecnologías para una agricultura sustentable. Buenos Aires: Ediciones INTA. Pp. 71-78. ISBN 978- 987-1623-21-1.
-