

Evaluación del intervalo hídrico óptimo en un brunosol éutrico típico bajo diferentes intensidades de uso agrícola

Rubio Dellepiane Valentina^{1*}, Gama Roldán Diana, Pérez Bidegain Mario², Quincke Andrés¹

¹ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria *Correo electrónico: vrubio@inia.org.uy

² Universidad de la República, Facultad de Agronomía

Recibido: 2016-12-13

Aceptado: 2018-01-30

Resumen

El intervalo hídrico óptimo (IHO) fue propuesto como un indicador de calidad física de suelo que integra en un único parámetro los efectos de la aireación, la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo sobre el crecimiento vegetal. El objetivo del presente estudio fue evaluar el IHO, conjuntamente con otras propiedades físicas del suelo, bajo diferentes sistemas de rotación y fertilización. Las determinaciones se desarrollaron en un Brunosol éutrico típico en Colonia, Uruguay, sobre un experimento de largo plazo de rotaciones agrícola-pastoriles, iniciado en el año 1963. Los tratamientos evaluados fueron: a) agricultura continua sin fertilización (ACs / Fert); b) agricultura continua fertilizada (AC); c) rotación de cultivos y pasturas con 50 % del tiempo bajo cultivos (50 % Cult) y d) rotación de cultivos y pasturas con 33 % del tiempo bajo cultivos (33 % Cult). El IHO disminuyó debido al incremento en la intensidad agrícola, variando entre 0,08 y 0,02 cm³ cm⁻³ para los tratamientos 33 % Cult y ACs / Fert respectivamente, permitiendo detectar un deterioro en la calidad física de los suelos. El análisis de los límites que conforman el indicador permite entender las posibles limitantes a las que se enfrentan los cultivos, mostrando que la aireación y resistencia a la penetración resultan más limitantes a mayor intensidad de uso agrícola del suelo.

Palabras clave: indicador de calidad física de suelos, compactación del suelo, intervalo hídrico óptimo, rotaciones cultivo-pasturas

Evaluation of the Least Limiting Water Range for a Typic Argiudoll under Different Intensities of Agricultural Use

Summary

The least limiting water range (LLWR) has been proposed as an indicator of physical soil quality that integrates aeration, penetration resistance, and soil water content effects on plant growth in a single parameter. The objective of this study was to evaluate the LLWR along with other soil physical properties under different rotation and fertilization treatments. The research was conducted on a typic Argiudoll, in Colonia, Uruguay, in a long-term crop-pasture rotation experiment started in 1963. The treatments evaluated were: a) continuous agriculture without fertilization (ACs / Fert), b) fertilized continuous agriculture (AC), c) crop-pasture rotations with 50 % of the time under crops (50 % Cult), and d) crop-pasture rotations with 33 % of time under crops (33 % Cult). The LLWR decreased with increasing cropping intensities, ranging between 0,08 and 0,02 cm³ cm⁻³ for treatments 33 % Cult and ACs / Fert, respectively. Thus, the LLWR allowed assessing a decline in soil physical quality. The analysis of the limits of the LLWR allowed understanding the possible physical restrictions that would be affecting plant growth, showing that aeration and resistance to penetration become increasingly limiting with higher cropping intensities.

Keywords: indicator of soil physical quality, soil compaction, least limiting water range, pasture-crop rotations

Introducción

La intensificación y expansión de la agricultura de cultivos para grano que se ha dado en las últimas décadas en Uruguay (DIEA, 2016) incrementa la necesidad de predecir, cuantificar y controlar los cambios en la calidad del suelo como un recurso vulnerable y no renovable. La degradación física de los suelos ha sido identificada como uno de los principales desafíos que enfrenta la agricultura (Hamza y Anderson, 2005). Por esto es necesario contar con un indicador capaz de detectar la degradación del suelo y que pueda ser relacionado con el crecimiento vegetal, para las condiciones edafoclimáticas.

La pérdida de calidad física del suelo trae como consecuencia un impacto negativo sobre la estructura del suelo, así como una pérdida en la capacidad de retener agua disponible para las plantas (Lal, 1999). Tradicionalmente el contenido de agua del suelo utilizable por los cultivos ha sido evaluado en base al concepto de agua disponible (AD), es decir considerando el contenido de agua (θ) retenida a -10 kPa (capacidad de campo, CC) y a -1500 kPa (punto de marchitez permanente, PMP) (Veihmeyer y Hendrickson, 1931). Sin embargo, este rango de humedad puede no ser óptimo para el crecimiento vegetal, particularmente en suelos de pobre estructura y/o alta densidad aparente (Letey, 1985). En estos suelos la tasa de difusión de oxígeno puede verse limitada a θ CC, siendo necesario un menor contenido de agua para mantener una adecuada aireación para los cultivos. En el otro extremo, a bajos contenidos de humedad, el crecimiento vegetal puede estar restringido por la resistencia mecánica del suelo (RP), inclusive a humedades mayores a las correspondientes a θ PMP. Consecuentemente, da Silva, Kay y Perfect (1994) proponen el Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) como un indicador de calidad física del suelo que integra en un único parámetro estos factores.

Además de θ CC y θ PMP, es necesario conocer otros dos atributos del suelo para estimar el IHO. Por un lado, el contenido de agua en el cual 10 % de los poros de suelo contienen aire (θ 10 % aire), siendo este el valor crítico de aireación asumido para gran parte de los cultivos (Mishra et al., 2015). Por otro lado, el contenido de agua a partir del cual la resistencia a la penetración supera los 2 MPa (θ RP = 2 MPa), siendo este un umbral a partir del cual el crecimiento radicular se ve limitado (Taylor, Roberson y Parker, 1966). El IHO es definido en el extremo húmedo por el valor menos húmedo entre θ 10 % aire y θ CC; mientras que en el extremo seco es definido por el valor

más húmedo del contenido de θ PMP y θ RP = 2 MPa. De esta manera existen cuatro formas de calcular el IHO dependiendo de qué valores toman sus límites:

1. Si ($\theta_{10\% \text{aire}} \geq \theta_{CC}$) y ($\theta_{RP=2 \text{MPa}} \leq \theta_{PMP}$): IHO = $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$
2. Si ($\theta_{10\% \text{aire}} \geq \theta_{CC}$) y ($\theta_{RP=2 \text{MPa}} \geq \theta_{PMP}$): IHO = $\theta_{CC} - \theta_{RP=2 \text{MPa}}$
3. Si ($\theta_{10\% \text{aire}} \leq \theta_{CC}$) y ($\theta_{RP=2 \text{MPa}} \leq \theta_{PMP}$): IHO = $\theta_{10\% \text{aire}} - \theta_{PMP}$
4. Si ($\theta_{10\% \text{aire}} \leq \theta_{CC}$) y ($\theta_{RP=2 \text{MPa}} \geq \theta_{PMP}$): IHO = $\theta_{10\% \text{aire}} - \theta_{RP=2 \text{MPa}}$

A vía de ejemplo la Figura 1 muestra una representación gráfica del IHO correspondiente a la segunda situación de las enunciadas anteriormente.

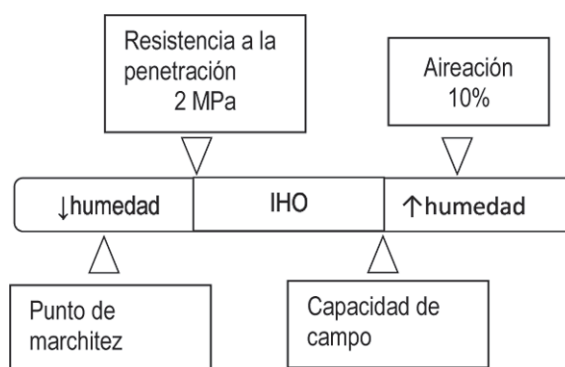


Figura 1. Representación esquemática del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO).

El IHO ha sido reportado por su capacidad para evaluar el impacto del tipo de suelo (Verma y Sharma, 2008; Safadoust et al., 2014), la rotación de cultivos o cultivos y pasturas (Lapen et al., 2004; Pereira et al., 2010; Cecagno et al., 2016) y los sistemas de laboreo (da Silva y Kay, 1997; Calonego y Rosolem, 2011) en la calidad física del suelo en diferentes regiones agroclimáticas y a diferentes profundidades. Sin embargo, son pocos los estudios realizados en regiones de clima subtropical como Uruguay. El IHO ha mostrado además ser un indicador que puede ser relacionado con el crecimiento vegetal (da Silva y Kay, 1996; Benjamin, Nielsen y Vigil, 2003; Kliein y Camara, 2007; Imhoff et al., 2010; Wilson, Sasal y Caviglia, 2013). Un mayor valor de IHO es preferible ya que es menor la probabilidad de que el contenido de agua del suelo, durante el ciclo del cultivo, esté fuera del rango óptimo. A medida que el IHO disminuye, los cultivos podrán estar sometidos a estrés de manera más frecuente (da Silva y Kay, 1996). El objetivo de este trabajo fue evaluar la sensibilidad del IHO a la rotación de cultivos y a la fertilización en condiciones subtropicales en un Brunosol éutrico típico sometido a 48 años de manejo

contrastante en cuanto a la intensidad de uso agrícola. Adicionalmente, se contrasta su comportamiento con otros indicadores de calidad física de suelo.

Materiales y métodos

Descripción del experimento

Las determinaciones se realizaron en un experimento de rotaciones agrícola-pastoriles instalado en el año 1963, en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) La Estanzuela, Colonia, Uruguay. El suelo dominante en el área de estudio es un Brunosol éutrico típico (argiudol típico) de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas (DSF, 1979, escala 1:1 M), con textura franco arcillo limosa (29,2 % de arcilla) y con una pendiente moderada de 2-3,5 %. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con tres repeticiones y siete tratamientos que difieren en su intensidad de uso agrícola y sistema de fertilización. Las parcelas del experimento tienen 25 m de ancho por 200 m de largo, ubicadas en sentido de la máxima pendiente. Se trabajó con los cuatro tratamientos más contrastantes del experimento, los cuales se describen en el Cuadro 1. Originalmente los tratamientos se realizaban bajo laboreo convencional (con arados de reja, vertedera y laboreos secundarios realizados con cinceles o vibro cultivadores), siendo, desde la década de 1990, sustituido gradualmente por barbechos químicos y reducción del laboreo (utilizando cinceles y vibro cultivadores) y adoptándose el sistema de siembra directa (SD) (sin inversión del suelo) a partir de 2009. Todos los tratamientos, a excepción de AC s/fert, son fertilizados según los requerimientos por análisis de suelos con N y P (por más detalles sobre el experimento véase Morón, 2003).

Obtención de muestras y procesamiento

Se realizaron tres campañas de muestreo los días 15 de marzo, 25 de abril y 24 de mayo del año 2011 para los bloques I, II y III respectivamente. Al momento del muestreo todas las parcelas se encontraban en período de barbecho, excepto aquellas correspondientes al bloque I de los sistemas mixtos, que se encontraban en el segundo año de la pastura. Todas las muestras se tomaron en un radio de 5 m alrededor de un punto georeferenciado en el centro de cada parcela. Para la determinación del IHO se tomaron 15 muestras imperturbadas por parcela, utilizando anillos de acero (volumen=100 cm³). El $\theta_{10\%aire}$ fue determinado en la totalidad de las muestras imperturbadas, doce de las cuales fueron analizadas para determinar $\theta_{RP=2MPa}$, en tanto las restantes tres se utilizaron para determinar θ_{CC} y θ_{PMP} . La profundidad de muestreo fue de 5 a 10 cm, profundidad donde se reportan mayores valores de Densidad aparente (Dap) y peor estructura del suelo en sistemas bajo SD (Soane et al., 2012).

Determinaciones para la construcción del IHO

Contenido hídrico a 10 % de poros con aire ($\theta_{10\%aire}$): para el cálculo de este parámetro se utilizó la fórmula propuesta por Hillel (1980):

$$fa = f - \theta_{vv} 10 \%$$

donde fa es la porosidad del suelo a una humedad dada (en este caso 10 %), f la porosidad total y θ_{vv} el contenido de agua volumétrico.

La porosidad total es calculada mediante la fórmula:

$$f = 1 - (Dap / 2,65)$$

donde Dap es densidad aparente y 2,65 Mg/m³ es el valor asumido para la densidad real del suelo (Dr). La Dap es

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
ACs/Fert	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo
AC	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo
50%Cult	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo c/PP	PP mixta		
33%Cult	Cebada c/T. Rojo	<u>Trébol Rojo</u>	Trigo c/PP	PP mixta		

calculada como peso seco sobre el volumen de la muestra, partiendo de la máxima expansión hídrica del suelo.

Contenido hídrico en el cual la RP es igual a 2 MPa ($\theta_{RP=2MPa}$): se determinó mediante el ajuste de una curva empírica entre la RP y el contenido volumétrico de agua (θ_{VV}) para cada tratamiento utilizando la metodología propuesta por Zou et al. (2000). Previo a la determinación de la RP las muestras saturadas fueron equilibradas en mesa de tensión a 0,6 m (para la determinación de macroporosidad) y secadas al aire en cuatro series de diferente duración, para alcanzar variabilidad de θ_{VV} en el rango de interés. Las determinaciones de resistencia a la penetración se realizaron con un penetrómetro de cono (Rimik CP10) con una punta adaptada para muestras confinadas en anillos, de área de cono 0,6 cm². El ajuste de las curvas para cada tratamiento se realizó buscando maximizar el coeficiente de determinación (r^2) obteniéndose valores desde 0,74 a 0,88.

Contenido hídrico a capacidad de campo y punto de marchitez permanente (θ_{CC} y θ_{PMP}): tres muestras imperturbadas por parcela, de suelo saturado, fueron equilibradas a tensiones de 0,1 y 1,5 MPa (utilizando cámaras de presión de Richards) para determinar el contenido hídrico a los potenciales de -0,1 y -1,5 MPa correspondientes a θ_{CC} y θ_{PMP} respectivamente.

Porosidad total, densidad aparente y carbono orgánico

La porosidad total del suelo y la Dap fueron determinadas para la totalidad de las muestras imperturbadas tomadas por parcela (metodología ya descrita). La macroporosidad fue determinada equilibrando muestras de suelo saturadas a una tensión de 0,6 m (~0,006 MPa) utilizando una mesa de tensión (Bezerra de Oliveira, 1968). Para la determinación de este parámetro se usaron las 12 muestras por parcela empleadas para la determinación de

$\theta_{RP=2MPa}$. Luego de medir la macroporosidad y la RP estas muestras se utilizaron para determinar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS). Para la determinación del COS se formó una muestra compuesta por parcela, y se empleó el método de combustión seca a 900 °C y detección con infrarrojo, utilizando un equipo LECO Truspec (Wright y Bailey, 2001).

Análisis estadístico

Fue realizado un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño en bloques para evaluar el efecto de la historia de uso del suelo en todas las variables, utilizando el programa Statistical Analysis System (ver versión 6.11; SAS Institute). En caso de existir diferencias significativas, las medias se separaron utilizando la diferencia mínima significativa (DMS) de Tukey, con un intervalo de confianza del 95 %.

Resultados

Propiedades físicas «clásicas» e IHO

El Cuadro 2 muestra los valores de Dap, macroporosidad, COS e IHO por tratamiento. Todos los indicadores permitieron detectar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El COS fue mayor en los tratamientos que incluyeron pasturas, no existiendo diferencias entre los sistemas de agricultura continua. La Dap fue menor en los sistemas que incluyeron pasturas e intermedia en AC. El mayor valor se alcanzó en ACs / Fert. La mayor macroporosidad se alcanzó en el tratamiento que incluyó 33 % de pasturas y la menor en ACs / Fert. El IHO fue menor en el tratamiento ACs / Fert comparado con los tratamientos que incluyen pasturas en la rotación.

Cuadro 2. Carbono orgánico, densidad aparente, macroporos, agua disponible e intervalo hídrico óptimo según tratamientos.

	COS (mg Cg ⁻¹)	Dap (g cm ⁻³)	Macroporos (%)	IHO (cm ³ cm ⁻³)
AC s/Fert	12,1 B	1,50 A	5,6 C	0,02 B
AC	15,2 B	1,44 B	7,1 B	0,05 AB
50 % Cult	21,7 A	1,31 C	7,8 AB	0,07 A
33 % Cult	24,0 A	1,33 C	8,7 A	0,08 A
Pr > F	0,0004	<0,0001	<0,0001	0,02

Letras distintas en la columna indican diferencias significativas según Test de Tukey (alfa = 5 %). AC s/ Fert: Agricultura continua sin fertilización; AC: Agricultura continua; 50 % Cult: 50 % Cultivos; 33 % Cult: 33 % Cultivos 67 % pasturas

Capacidad de campo, punto de marchitez permanente, aireación y resistencia a la penetración

El Cuadro 3 muestra los distintos límites del IHO según tratamientos. Los límites correspondientes a θ_{CC} y θ_{PMP} no permitieron detectar diferencias significativas entre los tratamientos. Estos límites no presentan una relación significativa con la Dap (Figura 2a) siendo el p-valor del ajuste de

Cuadro 3. Contenido hídrico de suelo a capacidad de campo, punto de marchitez permanente, 10 % de poros con aire y resistencia a la penetración de 2 MPa según tratamientos.

	θ_{CC}	θ_{PMP}	$\theta_{10\%aire}$ ($cm^3 cm^{-3}$)	$\theta_{RP=2MPa}$
Fert	0,38	0,29	0,34 C	0,31
AC	0,40	0,26	0,36 B	0,30
50 % Cult	0,41	0,28	0,40 A	0,29
33 % Cult	0,40	0,31	0,41 A	0,27
Pr > F	NS	NS	<0,0001	--
N	36	36	180	36*

Letras distintas en la columna indican diferencias significativas según Test de Tukey (alfa = 5 %).

* Se refiere al número de datos del que se parte para el ajuste de la gráfica RP vs humedad, para cada tratamiento.

0,53 y 0,52 para θ_{CC} y θ_{PMP} respectivamente. El $\theta_{10\%aire}$ depende directamente de la Dap y por tanto muestra las mismas diferencias entre tratamientos que dicho indicador, con el cual tiene un r^2 de uno. Las diferencias entre tratamientos en el $\theta_{RP=2MPa}$ no pudieron ser evaluadas estadísticamente ya que se ajustó una única curva de RP vs humedad por tratamiento. Sin embargo, esta variable mostró una relación positiva y significativa con la Dap (p-valor = <0,0001; $r^2 = 0,74$).

Relación entre el IHO y densidad aparente

La relación entre el IHO y la Dap es significativa (p-valor < 0,0001) y negativa (Figura 2b). Es decir, el IHO se hace más estrecho a medida que aumenta la Dap. A partir de esta relación lineal se determinó que la Dap tendría un valor de 1,59 $g cm^{-3}$ para un IHO igual a cero.

Frecuencia de los límites del IHO

Además de considerar los valores absolutos, el IHO puede ser evaluado a través de los límites que lo definen en cada situación. En los sistemas de agricultura continua el límite inferior del IHO fue $\theta_{RP=2MPa}$ en el 66 % de los casos. En los sistemas mixtos, el porcentaje de casos en los que el límite inferior del IHO fue $\theta_{RP=2MPa}$ se reduce al 33 %. El límite superior en los sistemas de agricultura continua es en el 100 % de los casos el $\theta_{10\%aire}$, mientras que en los sistemas mixtos este factor resulta el más limitante sólo en el 50 % de los casos.

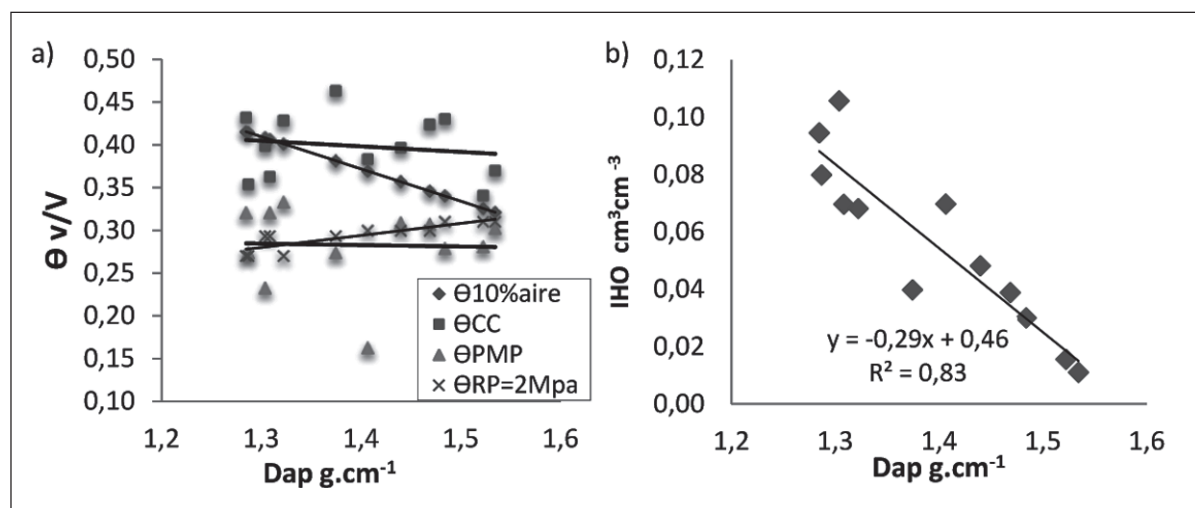


Figura 2. Relación entre el IHO y la Dap. a) Contenido de agua (θ) en función de la densidad aparente a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), aireación (10 % aire) y resistencia a la penetración (RP = 2 Mpa) b) Relación entre el Intervalo hídrico óptimo (IHO) y la Densidad aparente (Dap).

Discusión

Sensibilidad del IHO y de los otros indicadores de calidad de suelo evaluados

Los tratamientos con rotaciones mixtas, en los cuales las pasturas son manejadas con cortes (sin remoción ni pastoreo animal), muestran una mejor calidad física de suelo en relación los sistemas de agricultura continua, según todos los indicadores evaluados. Los contrastes en producción e incorporación de biomasa al suelo entre tratamientos y la reducción en la erosión del suelo debido a la incorporación de pasturas en la rotación explican gran parte de estas diferencias (Morón y Quincke, 2010).

La magnitud de los cambios detectados varió para los distintos indicadores evaluados, siendo el IHO el que mostró un mayor impacto relativo de los tratamientos. A pesar de esto, el IHO permitió detectar diferencias estadísticamente significativas únicamente entre el tratamiento de ACs / Fert y los tratamientos con pasturas. La Dap fue el indicador que permitió una mayor discriminación entre tratamientos, mostrando diferencias entre los sistemas mixtos y aquellos de agricultura continua. La Dap también permitió discriminar entre los dos sistemas continuos, que se diferencian por la fertilización. Los demás indicadores evaluados mostraron similitudes con la Dap en cuanto al patrón de respuesta, pero logran una menor discriminación entre los tratamientos. Ninguno de los indicadores evaluados permitió determinar diferencias debidas al largo de las pasturas en la rotación.

El rango de valores obtenido para el IHO (de $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) concuerda con el esperado para suelos con texturas similares donde se ha encontrado que valores cercanos a cero son frecuentes (Calonego y Rosolem, 2011; Safadoust et al., 2014). Esto implicaría que los cultivos crecen de manera óptima en un rango de humedad estrecho y por tanto la probabilidad de estrés es alta, principalmente en aquellos suelos bajo agricultura continua y sin fertilización.

Estimación del agua disponible para los cultivos

Considerando los grandes contrastes evaluados y las diferencias observadas en Dap y macroporos, variables determinantes de la capilaridad y la capacidad de campo del suelo (Silva Barboza, 2011), era esperable que existieran diferencias en el AD entre los tratamientos. A pesar de esto, el AD y sus límites no siguen la misma tendencia encontrada por los demás indicadores evaluados ni con la

intensidad de uso agrícola. Igualmente, estos resultados concuerdan con lo reportado por varios autores (da Silva, Kay y Perfect, 1994; Betz et al., 1998; Tormena, da Silva y Libardi, 1999; Zou et al., 2000) respecto a la menor sensibilidad del AD a la intensidad de uso del suelo en relación al IHO. En este estudio, el AD no resultó un buen indicador de calidad de suelo. Considerando el desvío estándar encontrado para el indicador, serían necesarias al menos 11 muestras por parcela para poder estimar la media de cada tratamiento con un 95 % de confianza (estimado según Steel y Torrie, 1960).

Independientemente de la intensidad de uso del suelo, se encontró que el IHO permitiría determinar el agua realmente disponible para los cultivos mejor que el AD en el suelo en estudio, ya que en 11 de los 12 casos evaluados el mismo fue menor que AD. Esto coincide con lo reportado por Calonego y Rosolem (2011) para suelos de similar textura e implica que otros factores restringen el acceso al agua. Observar los límites que conforman al IHO en las diferentes situaciones permite evaluar los factores que pueden estar limitando el desarrollo de los cultivos en cada caso. En los sistemas con mayor degradación las limitantes por aireación se dan a menores contenidos hídricos, aumentando la proporción de casos donde esta variable resulta limitante. Un comportamiento similar fue observado en el $\theta_{RP=2 \text{ MPa}}$, que en suelos con mayor Dap ocurrió a mayores contenidos hídricos. Estos resultados resaltan la importancia de integrar los conceptos de resistencia a la penetración y aireación a la evaluación del estado hídrico para los cultivos en suelos de texturas finas, principalmente aquellos de mayor intensidad agrícola donde las limitantes físicas pueden ser mayores.

Interpretación de los valores de IHO, densidad aparente crítica y grado de compactación

Si bien hay que tener en cuenta que se analizó un solo estrato del perfil siendo aquel en el cual se han reportado las mayores limitantes en siembra directa, valores tan estrechos de IHO parecen no concordar con los rendimientos obtenidos en el experimento, que a modo de ejemplo, en los dos años previos a este estudio para trigo y cebada, fue de 4930 kg ha^{-1} en promedio para los tratamientos con pasturas. La relación entre el IHO y el rendimiento de los cultivos no siempre resulta significativa, lo que ha llevado al cuestionamiento del indicador y de los valores críticos definidos para sus distintos límites (Pilatti et al., 2012). Relacionar los indicadores de calidad física del suelo con el rendimiento de los cultivos es difícil, principalmente debido a la

gran interacción con las variaciones climáticas (Batey, 2009). En respuesta a esto, varios autores proponen usar el número de días en los cuales el contenido de agua del suelo se encuentra fuera del rango del IHO en lugar de usar el indicador directamente, lo cual mejoraría la predicción de los rendimientos (da Silva y Kay, 1996; Benjamin, Nielsen y Vigil, 2003; entre otros). En este sentido, estudios nacionales que permitan evaluar la relación entre el IHO (y/o la probabilidad de estrés) y los rendimientos de los cultivos son necesarios.

En ninguno de los tratamientos evaluados se superó la Dap crítica, estimada en $1,59 \text{ g cm}^{-3}$, lo cual restringiría totalmente el crecimiento vegetal. La Dap crítica estimada en este estudio a partir de la curva de Dap vs IHO es similar al valor obtenido usando la ecuación propuesta por Reichert et al. (2009) para Oxisoles y Alfisoles (donde Dap crítica $\text{IHO} = 1,61 \text{ g cm}^{-3} = 0,00078 * \text{arcilla g kg}^{-1} + 1,83803$). Esto contrasta con lo reportado por Wilson, Sasal y Caviglia (2013), quienes concluyen que la ecuación de Reichert et al. (2009) no sería apropiada para molisoles ya que los valores determinados por ellos resultan inferiores a los obtenidos con esta ecuación. En el estudio de Wilson, Sasal y Caviglia (2013) el gradiente de Dap es generado de forma artificial, compactando muestras indisturbadas de suelo en laboratorio, lo cual podría explicar parte de las diferencias encontradas. Considerando el alto grado de complejidad que tiene la determinación de IHO, contar con ecuaciones que permitan estimar un valor de Dap crítica a partir de propiedades de fácil determinación como la textura sería de gran utilidad. Para esto sería necesario validar la ecuación de Reichert et al. (2009) en otros suelos de la región con diferente grado de compactación generado por el uso y manejo, así como diferentes texturas.

Conocer el valor de Dap crítica de un suelo permite estimar el grado de compactación relativo de diferentes situaciones a evaluar. La estimación del grado de compactación tiene la ventaja de ser independiente de la textura del suelo y por tanto permite comparar suelos distintos. El grado de compactación (GC) es estimado como:

$$\text{GC} = (\text{Dap} / \text{Dap crítica}) * 100$$

Para el estrato en estudio el grado de compactación de los diferentes tratamientos evaluados fue de 94, 90, 82 y 83 % para los tratamientos de ACs / Fert, AC, 50 % cult y 33 % cult respectivamente. Compactaciones moderadas pueden tener un efecto positivo sobre el rendimiento de los cultivos (Hamza y Anderson, 2005), sin embargo, una vez superado el valor óptimo de compactación se generan dis-

minuciones en el rendimiento (Lipiec y Simota, 1994). Por tanto, la respuesta en rendimiento de los cultivos a la compactación es usualmente reportada como parabólica, con un valor óptimo en niveles intermedios que oscilan entre un 80-90 % (variando según la metodología empleada para la determinación de la Dap crítica) (Lipiec y Simota, 1994; Arvidsson y Håkansson, 2014). Nuestros resultados indicarían que a pesar de los estrechos valores encontrados para el IHO sólo el sistema ACs / Fert se encuentra fuera del rango de GC óptimo del suelo. Esto pone de manifiesto la importancia de relativizar los valores de IHO a la hora de interpretarlos.

En una reciente revisión sobre el IHO, de Jong van Lier y Gubiani (2015) analizan sus limitantes como indicador de calidad física del suelo. Ellos concluyen que el IHO basado meramente en la determinación de sus límites implica relegar la comprensión real del funcionamiento del sistema a un segundo plano de importancia. En tal sentido, el marco conceptual propuesto por Reichert et al. (2016) se basa en propiedades tanto de capacidad como de intensidad. Precisamente serían estas últimas las que permiten dar cuenta de la funcionalidad de los componentes y/o procesos del suelo, por ejemplo de la porosidad, cuantificada por medio de la conductividad hidráulica o la permeabilidad del aire (Mentges et al., 2016).

De todas formas, en nuestra opinión el IHO es un abordaje conceptual válido para comprender y valorar los principales estreses que un suelo dado puede potencialmente ofrecer a un cultivo. Como fue mencionado, es necesario evaluar su relación con la performance de los cultivos. Estudios como este permiten relacionar el IHO con propiedades menos complejas y más fáciles de medir (como por ejemplo la densidad aparente), para entonces estimar el IHO indirectamente y/o mejorar la interpretación de la densidad aparente en base a los límites del IHO.

Conclusiones

El IHO, al igual que los demás indicadores clásicos evaluados en este estudio (Dap, macroporosidad y COS), permitió determinar pérdidas de calidad física del suelo con el aumento de la intensidad de uso agrícola y la falta de fertilización. Estos resultados llevan a concluir que el IHO permitiría reconocer diferencias cuantitativas en la calidad física del suelo. Sin embargo, el IHO no permitió una mayor discriminación entre tratamientos que la Dap. Si se considera además la mayor complejidad para la determinación del IHO, el uso del mismo no presentaría ventajas frente a los indicadores clásicos más utilizados cuando el objetivo

del estudio es detectar diferencias entre distintas situaciones.

Sin embargo, comparado con los indicadores más simples, el IHO presenta la ventaja de que los límites que lo conforman se relacionan con el crecimiento vegetal. En este sentido, nuestros resultados muestran una mayor sensibilidad del IHO a la degradación de suelo respecto al AD, así como también la alta frecuencia con la cual la aireación y la resistencia a la penetración resultan limitantes en el suelo en estudio, representativo de los suelos agrícolas del Uruguay. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de incorporar estos parámetros a la hora de evaluar el contenido de agua realmente disponible para los cultivos.

Por otro lado, el indicador mostró una correlación significativa con la Dap, lo que permitió determinar la Dap crítica del suelo en estudio. Esta estimación permitiría relativizar, para diferentes situaciones, la Dap observada en relación a la Dap crítica del suelo, lo cual sería de gran utilidad a la hora de interpretar los valores de Dap de los suelos en relación al crecimiento de los cultivos. Más estudios son necesarios para determinar la relación entre el IHO y el número de días en los que el contenido de agua del suelo se encuentra fuera del rango óptimo y la productividad de los cultivos en estas condiciones.

Agradecimientos

A todos los funcionarios del Laboratorio de Suelos y Aguas y la sección de Manejo y Fertilidad de Suelos de INIA La Estanzuela, por la ayuda brindada durante el trabajo de campo de la tesis de grado de VRD y DGR. Al Ing. Agr. Claudio García (INIA Las Brujas) por la colaboración con el análisis de las muestras.

Bibliografía

- Arvidsson, J. y Håkansson, I. (2014). Response of different crops to soil compaction—Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil Tillage Research*, 138, 56–63.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management: A review. *Soil Use Management*, 25(4), 335–345. doi:10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x.
- Benjamin, J. G., Nielsen, D. C. y Vigil, M. F. (2003). Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116, 137–148.
- Betz, C. L., Allmaras, R., Copleand, S. y Randall, G. (1998). Least limiting water range, traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1384–1393.
- Bezerra de Olivera, L. (1968). Determinação de macro e microporosidade pela «mesa de tensão» em mostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasil*, 3, 197–200.
- Calonego, J. C. y Rosolem, C. A. (2011). Least limiting water range in soils under crop rotations and chiseling. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 759–769.
- Cecagno, D., Costa, S. E. V. G. de A., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., ... y Carvalho, P. C. F. (2016). Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Research*, 156, 54–62. doi:10.1016/j.still.2015.10.005.
- da Silva, A. P. y Kay, B. D. (1996). The sensitivity of shoots growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*, 184, 323–329.
- da Silva, A. P. y Kay, B. D. (1997). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 877–883.
- da Silva, A. P., Kay, B. D. y Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1775–1781.
- DIEA. (2016). *Anuario estadístico agropecuario 2016*. Montevideo: MGAP. Recuperado de <https://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario2016>
- DSF. (1979). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* (vol. 3). Montevideo: MAP.
- Hamza, M. A. y Anderson, W. K. (2005) Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Research*, 82, 121–145. doi:10.1016/j.still.2004.08.009
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Nueva York: Academic Press.
- Imhoff, S., Kay, B. D., da Silva, A. P. y Hajabbasi, M. A. (2010). Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 303–310
- Jong van Lier, Q. y Gubiani, P. (2015). Intervalo hídrico óptimo: Repensando a pesquisa em física do solo no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(4), 925–939. doi:10.1590/01000683rbc20140596
- Klein, V. A. y Camara, R. K. (2007). Rendimiento da soja e intervalo hídrico óptimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(2), 221–227.
- Lal, R. (1999). *Soil quality and soil erosion*. Iowa: Soil and Water Conservation Society.
- Lapen, D. R., Topp, G. C., Gregorich, E. G. y Curnoe W. E. (2004). Last limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research*, 78(2), 151–168.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1, 277–293.
- Lipiec, J. y Simota, C. (1994). Crop responses in Central and Eastern Europe. En B. D. Soane y C. van Ouwerkerk (eds.). *Soil compaction in crop production* (pp. 365–389). Amsterdam: Elsevier.
- Mentges, M. I., Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Awe, G. O. y Mentges, L.R. (2016). Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma*, 263, 47–59. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.042.
- Mishra, A. K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T. K., Sharma, A. R. y Singh R. (2015). Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil and Tillage Research*, 150, 43–56.
- Morón, A. (2003). Principales contribuciones del experimento de rotaciones de cultivos-pasturas de INIA La Estanzuela en el área de fertilidad de suelos (1963-2003). En *Simposio 40 años de Rotaciones Agrícolas-Ganaderas INIA La Estanzuela (2003, Colonia Uruguay)* (pp. 1–8). Montevideo: INIA.
- Morón, A. y Quincke, A. (2010). Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. En *Jornada técnica de INIA La Estanzuela* (pp. 5–10). Montevideo: INIA. (Serie actividades de difusión, 605)

- Pereira, F. S., Andiolli, I., Beutler, A. y De Almeida, C. (2010). Physical quality of an oxisol cultivated with maize sited to cover crops in the pre-cropping period. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(1), 211-217
- Pilatti, M. A., Orellana, J. A., Imhoff, S. y da Silva, A. (2012). Revisión de los límites críticos del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 30(1), 9-21.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Rainer, H. y Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Research*, 102, 242-254.
- Reichert, J. M., Trevisan da Rosa, V., Saldanha E., Peres da Rosa, D., Horn, R., Reinert, D. J. y Sattler, A. (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil Tillage Research*, 158, 123-136.
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A. A., Gharabaghi, B. y Moseddeghi, M. R. (2014). Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management*, 136, 34-41.
- Silva Barboza, F. D. (2011). *Funções de pedotransferencia para solos do sul do Uruguai* (tesis de maestría). Universidad Federal de Santa María, Santa María Brasil.
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F. y Roger-Estrade, J. (2012). No till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87.
- Steel, R. G. y Torrie, J. H. (1960). *Principles and Procedures of Statistics: With special Reference to the Biological Sciences*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Taylor, H. M., Roberson, G. M. y Parker, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse textures soil materials. *Soil Science*, 102(1), 18-22.
- Tormena, C. A., da Silva, A. P. y Libardi, P. L. (1999). Soil physical quality of a Brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52, 223-232.
- Veihmeyer, F. J. y Hendrickson, A. H. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, 32(3), 181-193. doi:10.1097/00010694-193109000-00003.
- Verma, S. y Sharma, P. K. (2008). Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil and Tillage Research*, 1, 1-9.
- Wilson, M., Sasal, M. y Caviglia, O. (2013). Critical bulk density for a Molisol and Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*, 192, 354-360
- Wright, A. F. y Bailey, J. S. (2001). Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. *Soil Science and Plant Analysis*, 32(19-20), 3243-3258.
- Zou, C., Sands, R., Buchan, G. y Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, 38, 947-958.