

INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO EN UN ARGUJUDOL DEL SO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES EN DOS SISTEMAS DE LABRANZAS

JULIO O. IGLESIAS^{1*}, JUAN A. GALANTINI², ADRIAN VALLEJOS¹ & SILVIA IMHOFF³

Recibido: 18/08/2020

Recibido con revisiones: 30/05/2021

Aceptado: 17/09/2021

RESUMEN

Las prácticas de manejo pueden alterar la estructura del suelo, influyendo sobre la disponibilidad de agua, la difusión de oxígeno y la resistencia mecánica con consecuencias en la productividad. El intervalo hídrico óptimo (IHO) es una herramienta útil, ya que integra los mencionados efectos. Se plantea que el IHO permite detectar mejor las diferencias entre sistemas de labranza en la disponibilidad de agua. La experiencia se realizó en el sudoeste bonaerense (SOB) en dos sistemas de labranza, siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). Las muestras de suelo se tomaron cada 5 cm hasta los 20 cm de profundidad y se determinó retención de agua, resistencia a la penetración (RP) y densidad aparente (DA) para calcular el IHO. En SD se encontraron los valores más altos de RP y DA. El IHO osciló entre 0,024 y 0,095 cm³ cm⁻³ en SD y 0,007 y 0,110 cm³ cm⁻³ en LC. El valor de DA donde la θ_{RP} reemplazó a θ_{PMP} como límite inferior del IHO fue 1,26 g cm⁻³ para LC y 1,29 g cm⁻³ para SD, encontrándose 20% de las muestras por encima de este valor en LC y 42 % en SD. LC presentó IHO mayor hasta DA 1,28 g cm⁻³, a partir de este valor disminuyó más rápidamente que SD quien presentó valores de IHO mayores a densidades superiores. La proyección de los límites críticos, mostraron que se alcanzaría la DA crítica a un valor mayor en SD que en LC (1,49 y 1,40 g cm⁻³, respectivamente) demostrando mejor condición física de este manejo. Para evaluar la sensibilidad del IHO se utilizaron 3 valores límite de θ_{RP} . La pendiente del IHO siempre fue menor en SD, indicando que la amplitud del IHO se reduce más suavemente con el aumento de DA en comparación a LC. Los resultados de este estudio sugieren al IHO como indicador para evaluar la disponibilidad hídrica en suelos del SOB con diferentes manejos.

Palabras clave: agua disponible; resistencia a la penetración, densidad aparente, calidad del suelo.

OPTIMAL WATER INTERVAL IN AN ARGUJUDOL IN SW BUENOS AIRES PROVINCE UNDER TWO TILLAGE SYSTEMS

SUMMARY

Management practices can alter soil structure, influencing water availability, oxygen diffusion, and mechanical resistance with consequences on productivity. Least limiting water range (IHO) is a useful tool, since it integrates these effects. It is suggested that the IHO allows showing tillage systems differences in the availability of water. The experience was carried out in the SW of Buenos Aires province (SOB) with two tillage systems, no- (SD)

¹ Departamento de Agronomía (UNS), San Andrés 800, (8000) Bahía Blanca, Argentina.

² Comisión Investigaciones Científicas (CIC, Pcia. BA), CERZOS (UNS-CONICET) y Dpto. Agronomía (UNS).

³ Facultad Ciencias Agrarias (UNL) Kreder 2805, (S3080HOF) Esperanza, Argentina.

*Autor de contacto. jgalanti@criba.edu.ar, juangalantini@gmail.com



and conventional-tillage (LC). Soil samples were taken every 5 cm up to a depth of 20 cm and water retention, penetration resistance (PR) and bulk density (DA) were determined to calculate the IHO. Highest values of RP and DA were found in SD. The IHO ranged between 0.024 to 0.095 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ in SD and 0.007 to 0.110 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ in LC. The value of DA where θ_{RP} replaced θ_{PMP} as the lower limit of the IHO was 1.26 g cm^{-3} for LC and 1.29 g cm^{-3} for SD, with 20% of the samples above this value in LC and 42% in SD. LC presented higher IHO up to Da 1.28 g cm^{-3} , from this value it decreased more rapidly than SD who presented higher IHO values at higher densities. The projection of the critical limits showed that the critical DA would be reached at a higher value in SD than in LC (1.49 and 1.40 g cm^{-3} , respectively), showing better physical condition under no tillage soil. To evaluate the sensitivity of the IHO, 3 cutoff values of θ_{RP} were used. The slope of the IHO was always lower in SD, indicating that the amplitude of the IHO decreases more slowly with the increase in DA compared to LC. The results of this study suggest the IHO as an indicator to evaluate the water availability in SOB soils under different tillage.

Keywords: available water; penetration resistance, bulk density, soil quality.

INTRODUCCIÓN

Las prácticas de manejo pueden alterar la estructura del suelo, modificando las propiedades físicas, la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica, que en síntesis se refleja en la productividad de los cultivos y la sustentabilidad de los sistemas (Tormenta *et al.*, 1998). En este sentido, la disponibilidad de agua, la difusión de oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica influyen en la emergencia de las plantas, el crecimiento radicular y la producción de los cultivos (Letey, 1985). Por ello, la cuantificación y comprensión del impacto de las prácticas de manejo en las propiedades físicas del suelo, son fundamentales en el desarrollo de los sistemas agrícolas (Dexter & Young, 1992), sin embargo, es difícil cuantificar estos parámetros debido a la variabilidad espacial y temporal de la estructura del suelo (Dexter *et al.*, 1988).

El agua en el suelo es uno de los elementos claves para el crecimiento de las plantas, donde es tan importante la cantidad presente como el potencial al cual

está retenida y el acceso para las raíces. El potencial agua está referido a la energía necesaria por la raíz para extraer el agua del suelo, por tanto, para un mismo contenido de agua no siempre representa la misma disponibilidad (Letey, 1985). Conociendo la curva de retención de agua se puede inferir el potencial, y a partir de allí su disponibilidad para los cultivos.

La densidad aparente (DA) y la resistencia a la penetración (RP) en el suelo influyen sobre el rendimiento de los cultivos, presentando ecuaciones cuadráticas, con un R^2 de 0,62 y 0,59 respectivamente (Beutler *et al.*, 2008). La DA del suelo está relacionada con la difusión de oxígeno y la dinámica del agua, dado su asociación con el espacio poroso. Contenidos de agua superiores a la capacidad de campo ocupan el espacio poroso del suelo con disminución de la concentración de oxígeno necesaria para el metabolismo de las raíces. En general se acepta un 10% de la porosidad total del suelo como el límite del espacio poroso aéreo, considerando la porosidad total del



suelo al contenido hídrico a saturación (Pilatti *et al.*, 2012; Da Silva *et al.*, 1994; Grable & Siemer, 1968). Además, la DA también está relacionada con la resistencia mecánica y afecta el crecimiento de las raíces, donde es posible encontrar un valor de RP a partir del cual comienza a disminuir el crecimiento de raíces. La bibliografía muestra una gran dispersión de valores de RP como límite de crecimiento de las raíces. Gerard *et al.*, (1982), citado por Pilatti *et al.*, (2012), hallaron una relación entre la presión efectuada por las raíces y la medida por los penetrometros dependiendo del contenido de arcilla; Taylor *et al.*, (1966) propusieron el valor de 2 MPa donde las plántulas no emergen en condiciones satisfactorias; Taylor & Gardner (1963) informaron reducciones en la velocidad de crecimiento a partir de 1,3 MPa y la reducción total del crecimiento a partir de 2,9 MPa. Estos antecedentes ponen en evidencia las dificultades en encontrar el valor límite para el crecimiento de raíces en el suelo.

Varios estudios demuestran una relación estrecha entre las condiciones físicas y el crecimiento de las plantas (Tormena *et al.*, 2017). La interpretación del estado del suelo por medio de una integración entre propiedades físicas edáficas requiere un número mínimo de estas para obtener resultados confiables (Dexter *et al.*, 1988; Letey, 1985). Letey (1985) propuso integrar el contenido de agua disponible para la planta, la aireación y la RP en un solo parámetro que denominó “*non-limiting*

water range” (NLWR). Más tarde, Da Silva *et al.*, (1994) lo definieron como “least limiting water range” (LLWR), dado que el crecimiento varía en forma continua con el potencial mátrico, la disminución de la aireación y el aumento de la RP, y no en forma escalonada como la denominación propuesta por Letey (1985). Este parámetro fue denominado por Pilatti *et al.* (2012) como Intervalo Hídrico Óptimo (IHO).

La degradación de la estructura del suelo, considerando los diferentes parámetros físicos que la determinan, influye en el crecimiento de los cultivos, la eficiencia del uso del agua, la erosión del suelo y el escurrimiento (Perfect *et al.*, 1990; Pagliai *et al.*, 2004). En este sentido los diferentes sistemas de labranza modifican las propiedades físicas del suelo (Letey, 1985). Cuando se implementa la labranza convencional aumenta la exposición del suelo al aire, el sol y el viento, en cambio prácticas de laboreo mínimo como la siembra directa modifican el impacto de los ciclos mojado-secado, debido a la protección de residuos en superficie (Denef *et al.*, 2001; Galantini *et al.*, 2016). El IHO al integrar tres propiedades físicas relacionadas con el crecimiento de las plantas en un solo parámetro, es una valiosa herramienta para evaluar la calidad física de los suelos en diferentes sistemas de labranza. Varios investigadores han estudiado el IHO para evaluar calidad física de suelos, pero pocos lo han utilizado para evaluar sistemas de labranza (Guedes *et al.*, 2013; Olivera *et*



al., 2019; Li *et al.*, 2020). El IHO fue utilizado con resultados satisfactorios para detectar diferencias entre manejos en suelos de la región pampeana húmeda (Imhoff *et al.*, 2006; Damiano & Moschini, 2011; Pilatti *et al.*, 2012), sin embargo, no se encontró información disponible en los suelos del SO de la Provincia de Buenos Aires (SOB).

Ante lo expuesto anteriormente se plantea como hipótesis que la capacidad de retener agua del suelo no se ve modificada por el sistema de labranza, sin embargo, la siembra directa mejora su disponibilidad y puede ser medida a través del intervalo hídrico óptimo.

Objetivo: Determinar el intervalo hídrico óptimo en un Argiudol típico durante 23 años en siembra directa y labranza convencional, en el SOB.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se realizó durante el año 2009, sobre dos parcelas de 8 ha aproximadamente cada una en el establecimiento “Hogar Funke”, (38° 07' 06" S- 62° 02' 17" O) ubicado en el partido de Tornquist, SOB. Desde el año 1986, sobre estas parcelas, se implementaron dos sistemas de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

El suelo utilizado fue un Argiudol típico de textura franco limosa en el horizonte A (0-20 cm) y franco arcillosa en el B2 (20-37 cm).. El terreno fue sistematizado con curvas de nivel sin gradiente en el año 1975. La pérdida de suelo en los años

previos fue estimada de escasa consideración (Galantini *et al.*, 2006). Del año 2003 al 2009 la secuencia de cultivos fue Girasol oleico- Cebada cervecera- Girasol oleico- Trigo- Maíz para pastoreo- Trigo. Los años anteriores (1986-2002) fueron informados por Galantini *et al.* (2006). Mayores datos sobre el sitio experimental fueron reportados por Iglesias *et al.* (2017).

Para la realización del ensayo se seleccionó una parcela en SD y otra en LC. Las parcelas estaban divididas por una curva de nivel, a cada lado y paralelas a la misma se marcaron tres bloques de 15 m de frente por 20 m de fondo. Cuando el trigo sembrado se encontraba en estadio de macollaje (6-8 hojas según Zadoks *et al.*, 1974), en cada una de las unidades experimentales, se realizaron tres calicatas. Se tomaron, por calicata 6 muestras no disturbadas con cilindros de acero de volumen conocido (98,2 cm³), y una muestra disturbada. en las profundidades 0-5; 5-10; 10-15; 15-20 cm. Las muestras no disturbadas fueron tapadas hasta ser procesadas. Una vez preparadas adecuadamente se saturaron con aumento gradual de agua en un humectador de vidrio durante 24 hs. Las muestras disturbadas se secaron al aire y se tamizaron con tamiz de 2 mm.

Se determinó la retención de humedad de cada una de las muestras no disturbadas a diferentes tensiones (4, 8, 10, 33, 50, 100, 300, 500, 700) y en muestras disturbadas a 1500 kPa mediante mesa y



olla de presión (Klute, 1986). Una vez que las muestras estuvieron equilibradas se pesaron, se midió la resistencia a la penetración (RP) y se secaron en estufa a 105°C. Luego se determinó la densidad aparente (DA) y se calculó el contenido de agua para las diferentes tensiones (Klute, 1986).

Para la caracterización del suelo en estudio en las muestras disturbadas se determinaron: análisis granulométrico (mediante la pipeta de Robinson), obteniendo los porcentajes de limo, arcilla y arena; el Carbono orgánico (CO) (1500°C, LECO C Analyser) y se calculó el contenido de materia orgánica (MO) asumiendo un contenido del 58% de C en la MO; el Fosforo extractable (Pe) (Bray & Kurtz, 1945).

La RP se determinó con un micropenetrómetro manual con un cono de 30° de semi-ángulo, el diámetro de la base fue 3,74 mm y la superficie de la base es de 10,99 mm². Las medidas de RP se lograron introduciendo la barra de acero con el cono en el centro de cada cilindro. Las mediciones fueron cada 1 cm descartándose la primera ya que aumenta la resistencia a entre 0,5 y 1 cm de profundidad y luego tiende a ser constante, promediando las restantes.

El IHO se determinó como describe Da Silva *et al.* (1994) para cada una de las muestras con el valor de DA conocido. Los valores críticos del IHO fueron, RP 2,0 MPa (Taylor *et al.*, 1966), porosidad de aireación del suelo (PA) 0,10 m³ m⁻³ (Grable &

Siemer, 1968), CC (33 kPa) y PMP (1500 kPa).

El contenido volumétrico de agua (θ) se determinó a partir del potencial mátrico (ψ) y la DA, de acuerdo a la ecuación presentada por Leão *et al.* (2005).

$$\theta = \exp(a + b DA)\psi^c \quad (1)$$

Los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} se obtuvieron a partir de la ecuación (1) utilizando 33 y 1500 kPa. a, b y c son parámetros de ajuste del modelo. Para el cálculo de θ_{RP} a 2 MPa, se utilizó la ecuación (2) propuesta por Busscher (1990)

$$\theta_{RP} = d \theta^E DA^F \quad (2)$$

Donde d, e y f son parámetros de ajuste del modelo.

El contenido hídrico del suelo comprendido a 10 % de porosidad de aireación, (θ_{PA}) considerado adecuado para los cultivos, se determinó por medio de la Ecuación 3.

$$\theta_{PA} = [(1-DA/DP)-0,10] \quad (3)$$

Donde: θ_{PA} : contenido volumétrico de agua (cm³ cm⁻³); DA: densidad aparente (g cm⁻³); DP: densidad de las partículas (2,65 g cm⁻³).

La variación del IHO responde a los cambios de la DA dependiendo de la RP, por ello se usaron los siguientes límites de RP 1,31 MPa, valor donde se reduce la velocidad de crecimiento (Taylor & Gardner, 1963), 2 MPa, donde se reduce



notablemente la elongación radical y afecta la parte aérea (Da Silva *et al.*, 1994; Topp *et al.*, 1994) y 3,4 MPa, donde se detiene el crecimiento (Pilatti *et al.*, 2012).

DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño estadístico fue parcelas divididas con tres bloques completamente aleatorizados. Los datos en todas las tablas se presentan como medias en cada uno de los dos sistemas de labranza LC y SD. Las diferencias en los resultados obtenidos afectados por los sistemas de labranza, así como la interacción entre ellos, se evaluaron mediante análisis de la varianza (ANOVA) y la comparación de medias de tratamientos fue analizada por el test de Fisher utilizando un nivel de significancia del $\alpha \leq 5\%$. El análisis estadístico se realizó con el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la caracterización del suelo en estudio, se presentan los valores de algunas propiedades del suelo de los dos sistemas de labranza en estudio en la profundidad 0-20 cm (Tabla 1).

Tabla 1. Características del suelo bajo estudio (0-20 cm). Análisis granulométrico (arena, limo, arcilla), densidad aparente, carbono orgánico y fósforo extractable, en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

Table 1. Some characteristics of the soil under study at depth 0-20 cm, granulometric analysis, apparent density, organic carbon and extractable phosphorus, under no (SD) and conventional (LC) tillage.

Sistema	Variables					
	arena	limo	arcilla	DA	CO	Pe
		%		g cm ⁻³	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
SD				1,22	1,95	6,8
LC	18,4	55,2	26,4	1,13	1,81	6,2

Se analizó el estrato 0-20 cm como promedio de las cuatro profundidades muestreadas dado que no se encontró interacción significativa entre los estratos.

Los sistemas de labranza afectaron significativamente la DA y la RP (7 y 30,3%, respectivamente), las que fueron superiores en SD, resultados similares fueron informados por Li *et al.* (2020), para DA a inicios del ciclo del cultivo y para RP durante todo el ciclo. Los valores de humedad (θ) fueron similares en ambos sistemas estudiados (Tabla 2) coincidiendo con lo reportado por Guedes Fihlo *et al.* (2013)

La ausencia de laboreo en SD explicaría los mayores valores de DA en este sistema de labranza (Guedes Fihlo *et al.*, 2013; Pikul *et al.*, 2009; Tormena *et al.*, 2017).

Mayores valores de RP en SD se observaron al aumentar la DA, coincidiendo con los resultados obtenidos por Tormena *et al.* (2007).

En las ecuaciones (4) y (5) se presentan los coeficientes de ajuste de las ecuaciones (1) y (2) utilizados para la determinación de

Tabla 2. Resistencia a la penetración (RP) densidad aparente (DA) y contenido de agua (θ) de un Argiudol típico (0-20 cm) en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

Table 2. Penetration resistance (RP), bulk density (DA) and water content (θ) of a typic Argiudol (0-0.20 m) under no (SD) and conventional (LC) tillage.

Sistema	variable	Media	Desvío Standard	Mínimo	Máximo
SD	RP	1,061 b	0,589	0,033	3,105
	DA	1,222 b	0,129	0,899	1,457
	θ	0,320 a	0,056	0,205	0,502
LC	RP	0,7076 a	0,1217	0,0123	2,628
	DA	1,1365 a	0,0711	0,8023	1,4024
	θ	0,3183 a	0,5676	0,5229	0,1805

RP, resistencia a la penetración (MPa), DA, densidad aparente (g cm⁻³), θ contenido de agua del suelo (cm³ cm⁻³).

Para cada variable, letras distintas entre sistemas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$, Tet de Fisher)

la humedad volumétrica (θ) y la resistencia a la penetración (RP) en ambos sistemas de labranza

$$\text{LC } \theta = \exp(-1,5700 + 0,0500 * \text{DA}) * \Psi^{-0.1100} \quad r^2 = 0,73 \quad (4)$$

$$\text{SD } \theta = \exp(-1,500 + 0,0600 * \text{DA}) * \Psi^{-0.0900} \quad r^2 = 0,78 \quad (4)$$

Las ecuaciones ajustadas explicaron gran parte de la variabilidad de θ tanto en LC (73%) como en SD (78%).

La curva de RP en la ecuación (5) se correlacionó negativamente con la humedad y positivamente con la DA coincidiendo con Tormena *et al.* (1999) y Guedes Fihlo *et al.*

(2013). Las ecuaciones ajustadas explicaron el 75% para LC y el 59% para SD de la variabilidad de la RP.

Los modelos matemáticos usados para estimar RP en los sistemas de labranza estudiados fueron:

$$\text{LC } \text{RP} = 0,0400 * \theta^{-1,6200} * \text{DA}^{6,0800} \quad r^2 = 0,75 \quad (5)$$

$$\text{SD } \text{RP} = 0,0800 * \theta^{-1,5600} * \text{DA}^{3,6600} \quad r^2 = 0,59 \quad (5)$$

En las Figuras 1 a y b se presentan los contenidos de humedad (θ) para la porosidad de aireación (θ_{PA}), la capacidad de campo (θ_{CC}), el punto de marchitez

permanente (θ_{PMP}) y la resistencia a la penetración (θ_{RP}) en los dos sistemas estudiados para cada DA determinada. Los límites θ_{CC} aumenta muy poco al aumentar



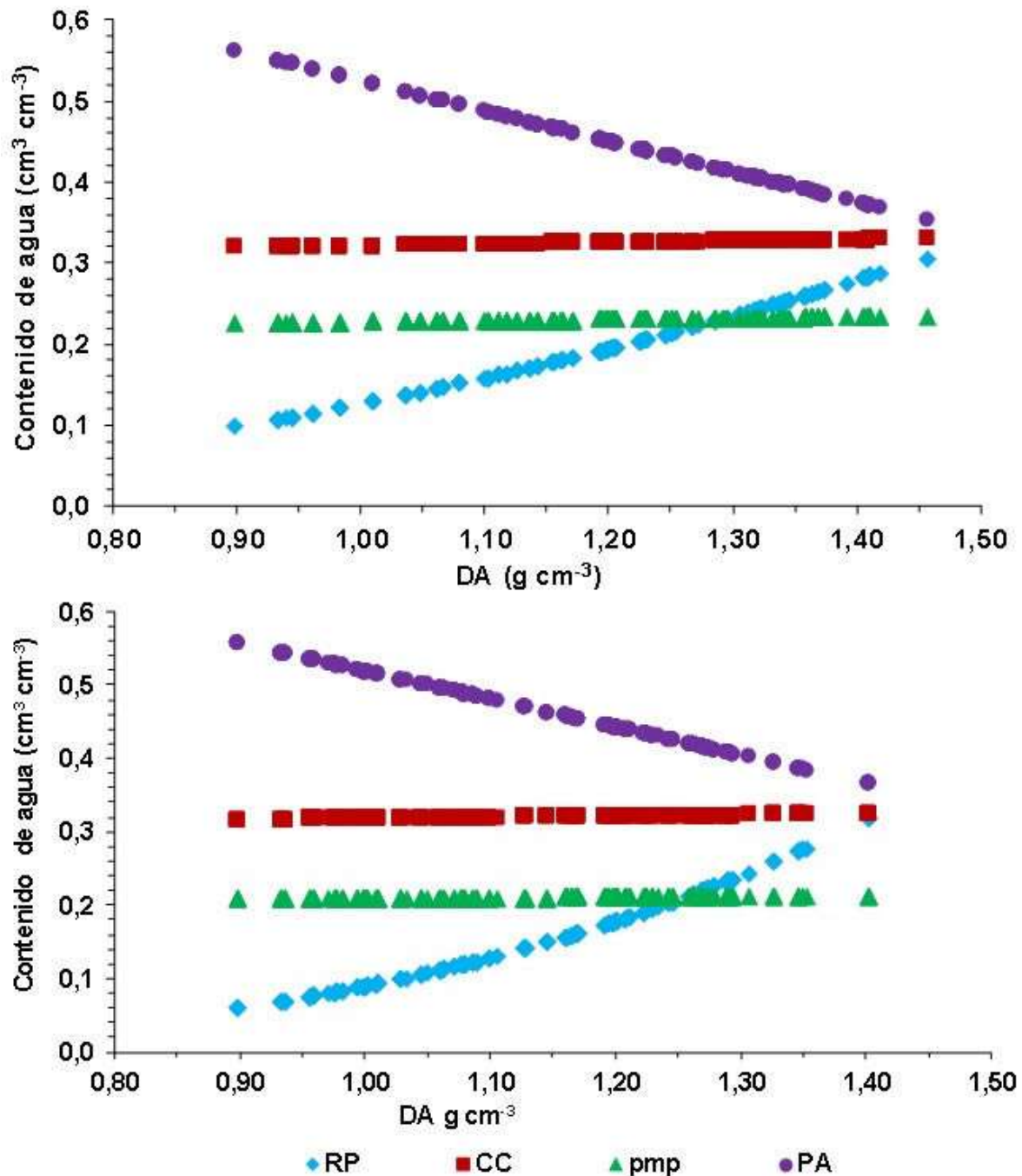
la DA en cambio θ_{PMP} no presentó variación. El contenido de agua fue afectado por θ_{RP} , que en ambos sistemas reemplazó al θ_{PMP} como límite inferior en línea con los resultados de Lima *et al.* (2020). La θ_{PA} no afectó el IHO en ninguno de los dos sistemas de labranza, dado que no alcanzó al límite superior presentado por θ_{CC} , aunque disminuyó cuando la DA aumentó, demostrando que en las DA medidas, el oxígeno no sería una limitación para el crecimiento y desarrollo de las raíces de los cultivos.

El valor de DA donde la θ_{RP} reemplazó a θ_{PMP} como límite inferior del IHO fué 1,26 g cm⁻³ en LC, determinando que el 20% de las muestras se encontraban sobre ese valor. En cambio, en el sistema SD la DA mostró un valor de 1,29 g cm⁻³, como límite inferior del IHO, presentando el 42 % de las muestras sobre ese valor. Esto indica que el IHO es más afectado por la DA en SD que en LC coincidiendo con las observaciones de Tormena *et al.* (1999) (Figura 1 a y b). Por otro lado, a igual DA en ambos sistemas de labranza, la humedad volumétrica en que la resistencia mecánica comienza a actuar como limitante es más elevada en LC que en SD, por ello, en LC cuando el suelo se seca la resistencia a la penetración afectará el crecimiento de las raíces antes que en SD. Estos resultados no concuerdan con Cornish (1993) y Tormena *et al.* (1999). El laboreo en labranza convencional afecta la unión entre las

partículas y agregados del suelo (Arthur *et al.*, 2013), mientras que el suelo en siembra directa, a largo plazo, acumula mayor contenido de materia orgánica, mejorando la agregación. En este suelo los valores de materia orgánica en 0-20 cm fueron 3,36 y 3,12 para SD y LC, respectivamente. Estas diferencias de materia orgánica estuvieron asociadas a cambios en la estabilidad de los agregados, presentando LC mayor inestabilidad y un incremento significativo de la fracción de agregados menores a 1 mm, que representa material con escasa agregación, la que duplicó el valor observado en SD (Iglesias *et al.*, 2017). Según Bradford (1986), si el diámetro del cono es más grande que las unidades estructurales, la resistencia medida por el penetrómetro es principalmente una función de la resistencia intra agregados. Esta condición de la estructura del suelo en LC dificultaría la penetración del cono del micropenetrómetro cuando aumentó la densidad aparente del suelo.

Según Da Silva *et al.* (1994), la DA donde el IHO=0 se denomina densidad crítica (DAC) y esto ocurre en la intersección entre los límites superior e inferior del IHO. La presencia de muestras con valores de DA próximos o superiores a DAC indican degradación del suelo (Imhoff *et al.*, 2001). En en los sistemas de producción estudiados no se alcanzó la DAC (Figura 1 a y b). La proyección de los límites críticos, muestran que se alcanzaría la DAC a um valor mayor





b]

Figura 1. Variación del contenido volumetrico de agua con la densidad aparente (DA) a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), porosidad de aireación (PA) y resistencia a la penetración (RP) en a) siembra directa y b) labranza convencional.

Figure 1. Variation of soil volumetric water content with bulk density (DA) at field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), aeration porosity (PA) and penetration resistance (RP) in a) no-tillage and b) conventional tillage.

en SD que en LC (1,49 y 1,40 g cm⁻³, respectivamente) lo que demuestra la mejor condición física del suelo en SD coincidiendo con Imhoff *et al.* (2016). Estos

resultados muestran que los cultivos podrían crecer en condiciones óptimas, extrayendo agua del suelo, a valores de DA más altas en SD que en LC. En estas

condiciones, de mayor DA, el intervalo de tiempo entre precipitaciones debería ser menor en LC que en SD para que la raíz del cultivo mantenga la habilidad de crecer y extraer agua en el suelo (Taylor *et al.*, 1966). El sistema de producción LC (**Figura 2**) fue quien que presentó un IHO mayor hasta la densidad $1,28 \text{ g cm}^{-3}$, pero a partir de este valor, el IHO disminuyó más rápidamente que en SD. Por lo tanto, SD mostró valores de IHO mayores a densidades superiores, resultados similares fueron informados por Oliveira *et al.* (2020). Imhoff *et al.* (2016) reportaron que suelos con menor contenido de MO parecen mostrar una tasa de disminución del IHO ligeramente mayor que los suelos con mayor MO. Esto sugiere que el sistema SD en el largo plazo mejoraría la estructura del suelo, probablemente debido al incremento en el contenido de MO, coincidiendo con Guedes Filho *et al.* (2013).

El mayor contenido de materia orgánica en SD elevó el θ_{PMP} , afectando la amplitud del IHO hasta que θ_{RP} comenzó a ser el límite inferior, Li *et al.*, (2020) encontraron resultados similares. El IHO osciló entre $0,024$ y $0,095 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en SD y $0,007$ y $0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en LC; con valores medios de $0,086$ y $0,104 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en SD y LC respectivamente. Por lo tanto, los valores del IHO estarían relacionados con la DA y la tasa de disminución del IHO estaría influenciada por el contenido de MO coincidiendo con Safadous *et al.* (2014) e Imhoff *et al.* (2016).

La DAC no fue alcanzada en ningún sistema, indicando que no hubo restricción total del crecimiento de las raíces del cultivo (**Figura 1 a y b**).

En un rango amplio de DA el IHO puede presentar diferente sensibilidad dependiendo del sistema de producción implementado. En el presente estudio se observó que la θ_{RP} fue el límite más influenciado por la DA a medida que el suelo se compacta. Para evaluar la sensibilidad del IHO (considerándola como el punto en que θ_{RP} comienza a limitar el IHO) se cambió uno de los límites manteniendo los demás constantes. Los valores de los límites para θ_{RP} del suelo fueron los ya utilizados en otros trabajos, $1,3 \text{ MPa}$ (Taylor & Gardner, 1963), $2,0 \text{ MPa}$ (Taylor *et al.*, 1966) y $3,6 \text{ MPa}$ (Pilatti *et al.*, 2012). La sensibilidad del IHO al cambio del valor de θ_{RP} aumentó con la disminución del valor de resistencia considerado crítico en ambos sistemas, pero con diferencias entre ellos (**Figura 3 a y b**). En ambos sistemas de labranza el IHO no mostró sensibilidad con los límites de θ_{RP} utilizados hasta una DA aproximada de $1,15 \text{ g cm}^{-3}$. A partir de dicho valor y para los tres valores críticos utilizados, la resistencia a la penetración comenzó a restringir el IHO antes en LC que en SD. Sin embargo, en todos los casos, la pendiente del IHO siempre fue menor en SD, indicando que en este sistema la amplitud del IHO se



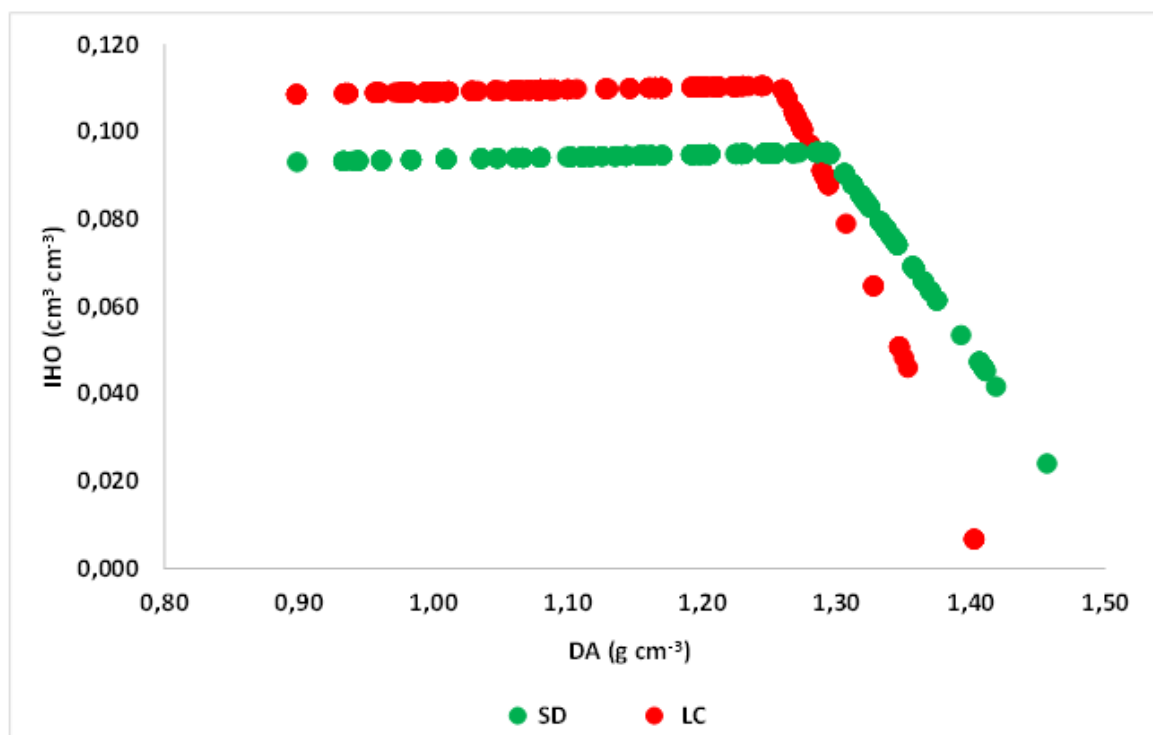


Figura 2. Variación del intervalo hídrico óptimo (IHO) con la densidad aparente (DA) en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

Figure 2. Variation of the Least limiting water range (IHO) with the apparent density (DA) in no-tillage (SD) and conventional tillage (LC).

reduce más suavemente con el aumento de DA en comparación a LC. Esto determina que en SD los valores de D_{Ac} serían mayores cuando se los compara con LC, dado que a 1,31 MPa de RP el IHO intercepta el eje de las abscisas a valores de DA mayores en SD que en LC. Analizando 2 MPa y 3,4 MPa la proyección de los datos del IHO seguirían la misma tendencia. Valores críticos de RP para el crecimiento de los cultivos entre 4,6 y 5,1 MPa para suelos sin labranza y 3,6 MPa para suelos laboreados fueron reportados por Ehlers *et al.*, (1983). El uso de valores en este rango, en lugar de 2 MPa, aumentaría el IHO en estos suelos en DA mayores a 1,26 g cm⁻³ en LC y 1,29 g cm⁻³ en SD. Sin embargo, no se producirían

diferencias a menores densidades aparentes.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de este ensayo, θ_{RP} fue el límite inferior del IHO, indicando que el IHO fue más afectado por la densidad aparente en labranza convencional que en siembra directa (menor número de muestras en LC por encima de este valor límite que las que se encontraron en SD).

La θ_{PA} no afectó el límite superior del IHO.

El IHO fue mayor en LC sólo hasta el valor de DA 1,28 g cm⁻³. A partir de este valor, el IHO se redujo más rápidamente en este sistema, denotando la mejor condición estructural del suelo en el sistema SD.

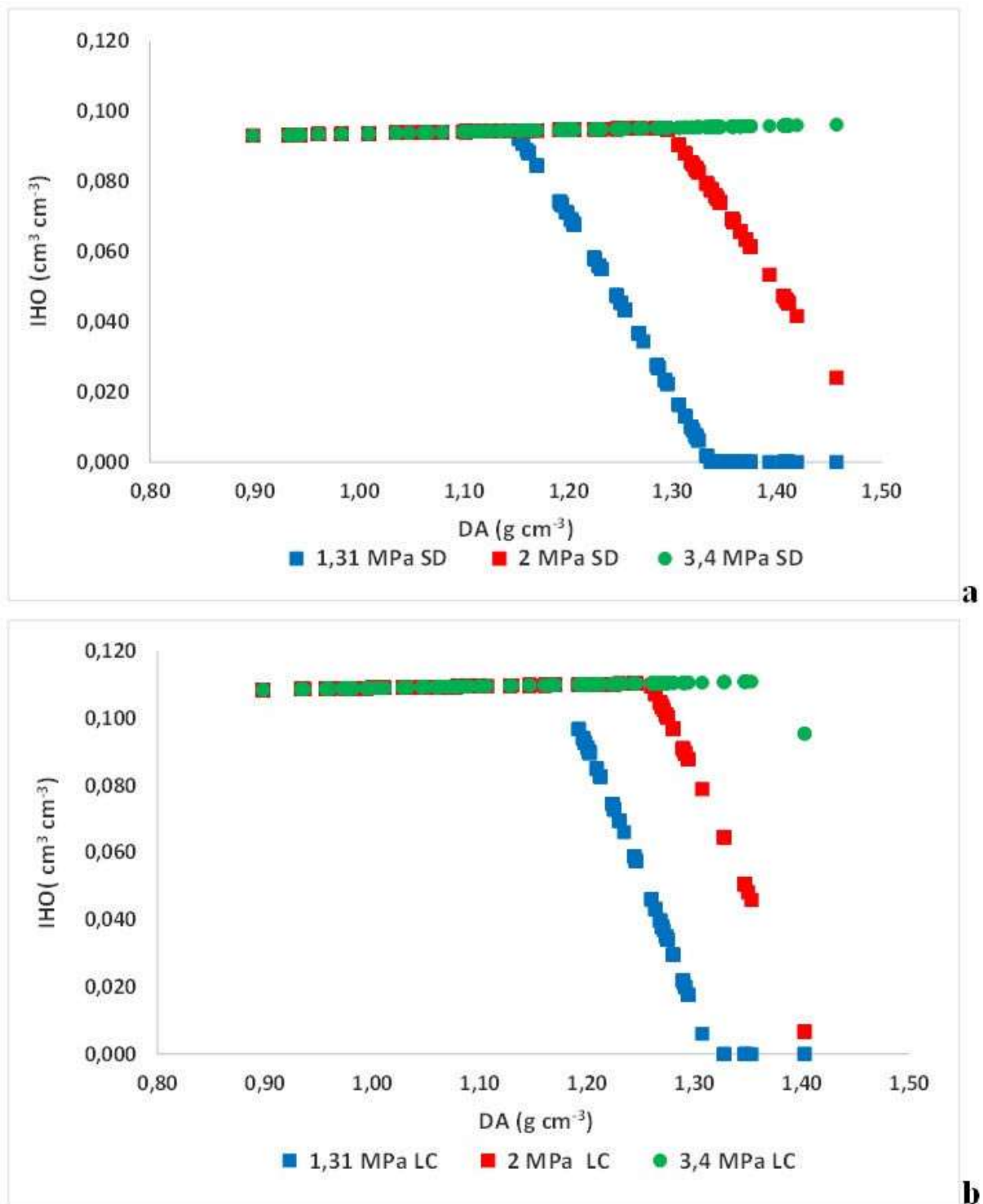


Figura 3. Variación del Intervalo hídrico óptimo (IHO) con la densidad aparente (DA) para diferentes valores críticos de θ_{RP} en a) siembra directa y b) labranza convencional.

Figure 3. Least limiting water range (IHO) variation with bulk density (DA) under different critic values of θ_{RP} in a) no-tillage and b) conventional tillage.

La utilización de tres valores críticos de resistencia a la penetración mostró que esta propiedad comenzó a restringir el IHO a valores más bajos de de DA en LC que en SD. Sin embargo, en todos los casos, la pendiente del IHO siempre fue menor en

SD, indicando que a esa densidad aparente el contenido de agua sería mayor y la DAC ocurriría a valores de densidad aparente mayores. Esta información muestra que en SD el rango de DA en que las plantas puedan crecer sin limitaciones es mayor.

Los resultados de este estudio sugieren al IHO como indicador para evaluar la disponibilidad hídrica en suelos del SOB con diferente manejo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arthur, E; P Schjønning; P Moldrup; M Tuller & LW de Jonge. 2013. Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. *Geoderma* 193-194: 236-245. doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.09.001
- Beutler, AN; JF Centurion; A Pires Da Silvaet; MA Pessoa da Cruz Centurion; Cristian Luarte Lionel. 2008. Soil compaction by machine traffic and least limiting wáter range related to soybean yield. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasilia 43(11) 1591-1600.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1),39-46.
- Busscher, WJ. 1990. Adjustment of flat tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans of ASAE Vol* 33(2) 519-524.
- Cornish, PS. 1993. Soil macrostructure and root growth of establishing seedings. *Plant and Soil* 151: 119-126.
- Da Silva, AP; BD Kay & E Perfect. 1994. Charecterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- Damiano, F & R Moschini. 2011. Intervalo Hídrico Óptimo en suelo argiudoles plantados con eualiptusdunnii Maiden. *Ci. Suelo* 29:1-11.
- Denef, K; J Six; H Bossuyt; SD Frey; ET Elliott; R Merckx & K Paustian. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil.Biol.Biochem.* 33(12-13), 1599-1611.
- Dexter, AR; R Horn & WD Kemper. 1988. Two mechanism for age-herdening of soil. *J. Soil Sci.* 39: 163-175.
- Dexter, AR & IM Young. 1992. Soil physic toward. *Soil Till. Res.* 24:101-106.
- De Oliveira, I. N; ZM de Souza; LH Lovera; CV Farhate; EDS Lima; DA Esteban & JÁ Fracarolli. 2019. Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. *Agric Water Manag*, 225, 105777
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo, InfoStat versión 2013, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Ehlers, W; U Köpke; F Hesse & W Böhm. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till Res* 3(3): 261-275.
- Galantini, JA; M Duval; JM Martinez; V Mora; R Baigorri; JM García-Mina. 2016. Quality and Quantity of Organic Fractions as Affected by Soil Depth in an Argiudoll under Till and No-till Systems. *International Journal of Plant & Soil Science* 10(5); doi: 10.9734/IJPSS/2016/25205.
- Galantini, JA; JO Iglesias; C Maneiro; L Santiago & C Kleine. 2006. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso. *Rev. Inv. Agrop.* 35:1. 15-30.
- Gerard, CJ; P Sexton & G Shaw. 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.* Vol 74: 875-879.
- Grable AR & EG Siemer. 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen



- diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32(2):180-186.
- Guedes Fihlo, O; H Blanco Canqui & AP Da Silva. 2013. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. *Geoderma* 07-208: 99-110. doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.008
- Iglesias, JO; JA Galantini & A Vallejos. 2017. Estabilidad de agregados de un argiudol del SO Bonaerense con diferentes sistemas de labranza. *Ci. Suelo* 35(2): 189-20.
- Imhoff S; A Da Silva; P Giberto; C Tormena; MA Pilatti & PL Libardi. 2016. Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina. *PLOS ONE* 11(4): e0153827. doi:10.1371/journal.pone.0153827
- Imhoff, S; AP Da Silva; M Dias Junior & CA Tormena. 2001. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25 (1): 11-18.
- Imhoff, S; J Gay; A Grioni & P Giberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fé determinada por medio del Intervalo Hídrico Optimo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de suelos de la región andina, 2006. Salta. Resúmenes en CD.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: *Methods of soil Analysis-Physical and Mineralogical. Methods 2ne ed.* (Ed. Klute A. Am. Soc. Agron. Madison, USA, p 635-662.
- Leão, TP; AP Da Silva; E Perfect & CA Tormena. 2005. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. *Agronomy Journal* 97, 1210-1215.
- Letey J. 1985. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In Springer-Verlag New York, Inc. *Adv in Soil Sci*, Vol (1) 277-295.
- Li, S; X Wu; G Liang; L Gao; B Wang; J Lu & A. Degré. 2020. Is least limiting water range a useful indicator of the impact of tillage management on maize yield?. *Soil Till Res*, 199, 104602.
- Lima, C L R D; PB Dupont; CN Pillon & ECC Miola. 2020. Least limiting water range, S-index and compressibility of a Udalf under different management systems. *Sci Agric*,77(1).
- Pagliai, M; N Vignozzi & S Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till Res* 79 (2) 131-143.
- Perfect, E; BD Kay; WK Van Loon; RW Sheard & T Pojasok. 1990. Rates of change in soil structural stability under forages and corn. *Soil Sci Soc of Am J.* 54(1): 179-186.
- Pikul, Jr, JL; G Chilon; J Rice; A Eynard; T Shumacher; K Nichols; JMF Johnson; S Wright; T Caesar & M Ellsbury. 2009. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. *Soil Sci Soc of Am J* 73 (1): 197-206.
- Pilatti, MA; J de Orellana; S Imhoff & A Pires Da Silva. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ci. Suelo* 30(1): 9-21.
- Safadous, A; P Feizzee; AA Mahboubi; B Gharabaghi & MR Mosaddeghi. 2014. Least limiting water range affected by soil texture and cropping system. *Agr. Water Manag* 136: 34-41.
- Taylor, HM; GM Roberson & JR Parker. 1966. Soil Strength-root penetration relations in médium to croace-textured soil materials. *Soil Sci.*102: 18-22.
- Taylor, HM & HR Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96(3): 153-156.
- Topp, G.C; YT Galganov; KC Wires & JLB Culley. 1994. Non-limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. Soil quality evaluation program technical report 2. Land Resource Division, Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food Canada, Research Branch, Ottawa.



- Tormena, CA; A Perez Da Silva & L Libardi. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till Res* 52 (223-232).
- Tormena, CA; MA Araújo; J Fidalski & JM da Costa. 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219.
- Tormena, CA; DL Karlen; S Logsdon; & MR Cherubin. 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Till Res*, 166, 122-130.
- Zadoks, JC; TT Chang & C F Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*. 14(6), 415-421

