

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DETERMINACIÓN DEL INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO DEL SUELO
EN SITUACIONES CONTRASTANTES DE INTENSIDAD DE USO AGRÍCOLA**

por

Diana GAMA ROLDÁN
Valentina RUBIO DELLEPIANE

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

MONTEVIDEO
URUGUAY
2012

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. PhD. Andrés Quincke

Ing. Agr. PhD. Mario Pérez Bidegain

Ing. Agr. M. Sc. Adriana García Lamothe

Fecha:

19 de julio de 2012

Autor:

Bach. Valentina Rubio Dellepiane

Bach. Diana Mariel Gama Roldán

AGRADECIMIENTOS

En especial a nuestras familias y amigos por su apoyo permanente a lo largo de toda nuestra carrera.

A nuestro director de tesis Andrés Quincke por darnos la posibilidad de realizar este trabajo, por su dedicación y su valiosa influencia en nuestra formación.

A Mario Pérez por su ayuda y permanente disposición.

A todos los funcionarios del Laboratorio de Suelos y Aguas y del galpón de suelos de INIA La Estanzuela, por la ayuda brindada durante el trabajo de campo y por compartir con nosotros sus conocimientos, en especial a Lalo Vergara.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. PROPIEDADES FÍSICAS QUE AFECTAN DIRECTAMENTE EL CRECIMIENTO VEGETAL.....	2
2.1.1. <u>Oxígeno y aireación</u>	2
2.1.2. <u>Temperatura</u>	2
2.1.3. <u>Resistencia a la penetración</u>	3
2.1.4. <u>Agua</u>	4
2.2. CALIDAD FÍSICA DEL SUELO.....	5
2.3. INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO.....	5
2.3.1. <u>El intervalo hídrico óptimo</u>	7
2.3.1.1. Factores intrínsecos del suelo que determinan los valores de IHO.....	9
2.3.1.2. Valores críticos de los parámetros que constituyen el IHO.....	15
2.3.1.3. Metodologías para estimar el IHO.....	22
2.3.1.4. Sensibilidad del indicador ante las prácticas de manejo.....	21
2.3.1.5. El IHO y el crecimiento vegetal.....	30
2.4. EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EN EL EXPERIMENTO DE ROTACIONES AGRÍCOLA- GANADERAS DE LA ESTANZUELA.....	35
2.4.1. <u>Carbono orgánico</u>	36
2.4.2. <u>Propiedades físicas y erosión</u>	38

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	40
3.1. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	40
3.2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS Y PROCESAMIENTO.....	42
3.3. DETERMINACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL IHO.....	42
3.3.1. <u>Contenido hídrico a 10% de poros con aire</u> ($\theta_{10\% \text{ aire}}$).....	42
3.3.2. <u>Contenido hídrico a resistencia a la penetración</u> <u>igual a 2 MPa ($\theta_{RP=2 \text{ MPa}}$)</u>	43
3.3.2.1. Ajuste de las curvas de RP en función de la humedad.....	43
3.3.3. <u>Contenido hídrico a capacidad de campo y punto</u> <u>de marchitez permanente (θ_{CC} y θ_{PMP})</u>	44
3.4. DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS.....	44
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	45
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	46
4.1. CARBONO ORGÁNICO, DENSIDAD APARENTE Y MACROPOROSIDAD.....	46
4.2. AGUA DISPONIBLE.....	48
4.3. INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO.....	49
4.3.1. <u>Comportamiento de los límites $\theta_{10\% \text{ aire}}$ y $\theta_{RP=2}$</u> <u>MPa</u>	49
4.3.2. <u>Intervalo hídrico óptimo</u>	52
4.3.2.1. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y el contenido de carbono orgánico.....	54
4.3.2.2. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y densidad aparente.....	55
4.3.2.3. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y macroporos.....	56
4.3.2.4. Límites que conforman el IHO, según tratamientos.....	57
4.4. RELACION IHO/AD.....	58
5. <u>CONCLUSIONES</u>	60

6. <u>RESUMEN</u>	62
7. <u>SUMMARY</u>	64
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	65
9. <u>ANEXOS</u>	72

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de los principales indicadores de calidad física de suelo.....	6
2. Resumen de los estudios realizados sobre el efecto de prácticas de manejo sobre el IHO.....	22
3. Resumen de trabajos que vinculan el IHO con el crecimiento vegetal.....	31
4. Resumen de los diferentes tratamientos del experimento de largo plazo de INIA La Estanzuela...	36
5. Descripción general de los tratamientos del experimento de rotaciones de INIA La Estanzuela, utilizados en el estudio.....	40
6. Carbono orgánico (CO), densidad aparente (Dap) y macroporosidad, según intensidad agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícolas-ganaderas de INIA La Estanzuela.....	46
7. Contenidos de humedad a capacidad de campo (símbolo), contenido de humedad a punto de marchitez permanente (pmp), y valor de agua disponible (AD), medidos en el experimento de rotaciones agrícolas- ganaderas de INIA La Estanzuela.....	48
8. Contenidos de humedad a 10% de poros con aire en el suelo (l) y contenido de humedad a una resistencia a la penetración igual a 2 MPa (kk), según la intensidad de uso agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícolas- ganaderas de INIA La Estanzuela.....	49
9. Intervalo hídrico óptimo (IHO), según la intensidad de uso agrícola medidos en el experimento de	52

rotaciones agrícolas- ganaderas de INIA La Estanzuela.....	
10. Cociente IHO/AD, según la intensidad de uso agrícola medidos en el experimento de rotaciones agrícolas- ganaderas de INIA La Estanzuela.....	58

Figura No.

1. Representación gráfica del intervalo hídrico óptimo, correspondiente al caso dos de las ecuaciones de Wu et al. (2003).....	8
2. Efecto de la densidad aparente sobre los límites que componen el intervalo hídrico óptimo, para dos tipos de suelos.....	12
3. Relación entre el IHO y la Dap, para un suelo arcilloso, bajo siembra directa y laboreo convencional.....	13
4. Relación entre el IHO y la Dap para dos suelos, franco arenoso y franco limoso.....	14
5. Penetración de las raíces primarias de algodón en función de la resistencia mecánica del suelo, para cuatro suelos de diferentes texturas.....	17
6. Evolución del CO en el experimento de rotaciones de La Estanzuela, para cuatro sistemas de rotaciones.....	37
7. Evolución de las propiedades físicas de suelo, en función de los años de pasturas (a) y de cultivos (b).....	39
8. Curva de resistencia a la penetración (RP) en	51

función de la humedad para los distintos sistemas estudiados del el experimento de rotaciones de La Estanzuela.....	
9. Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función del contenido de carbono orgánico del suelo (CO).....	55
10. Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función de la densidad aparente del suelo (Dap).....	56
11. Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función del contenido de macroporos del suelo.....	57

1. INTRODUCCION

El aumento en la intensidad del uso de suelo debido a la expansión de agricultura de cultivos para grano, que se ha dado en los últimos años en el Uruguay, incrementa la necesidad de predecir, cuantificar y controlar los cambios en la calidad del suelo, como un recurso vulnerable y no renovable.

Si bien los estudios en cuanto a calidad química del suelo son amplios, la calidad física del suelo ha sido históricamente menos estudiada en el mundo académico. Sin embargo, la posibilidad de que restricciones físicas estén limitando los rendimientos de los cultivos se ha convertido en una fuente de preocupación para los académicos del tema. Esto incrementa la necesidad de contar con un indicador relacionado con el crecimiento vegetal que permita cuantificar la calidad física de los suelos y evaluar estos cambios para los sistemas del Uruguay.

Entre los indicadores propuestos para la evaluación de la calidad física del suelo se encuentra el intervalo hídrico óptimo (IHO) o least limiting water range. Se trata de un indicador que integra en un único parámetro los efectos de la aireación, la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo, y se define como el contenido hídrico del suelo en el cual el crecimiento vegetal es menos limitado por estas restricciones (Da Silva y Kay, 1994). El mismo ha sido evaluado en varios países, encontrando que es un indicador pertinente para evaluar la degradación física del suelo, presentando además otros usos potenciales.

El objetivo de este trabajo es determinar el intervalo hídrico óptimo para un suelo representativo del litoral agrícola del Uruguay y determinar la sensibilidad del mismo ante diferentes intensidades de uso, comparándolo con indicadores clásicos de calidad física de suelo. Se parte de la hipótesis de que el IHO será un indicador sensible a la calidad física de suelos.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO QUE AFECTAN DIRECTAMENTE EL CRECIMIENTO VEGETAL

Las propiedades físicas del suelo determinan el flujo de energía, agua y nutrientes que estarán disponibles para el crecimiento vegetal, estableciendo así el potencial de producción del ambiente.

Considerando la importancia de las propiedades físicas para el crecimiento vegetal, Letey (1985) propone separar aquellos factores que afectan de manera directa, de los que tienen un efecto indirecto sobre el mismo. El agua, el oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica que impiden la emergencia de los cultivos o la expansión radicular afectan directamente el crecimiento vegetal. Otras propiedades del suelo, como densidad aparente, porosidad y materia orgánica, tienen efectos indirectos sobre el crecimiento vegetal.

En esta sección se realizara una breve caracterización sobre las cuatro propiedades que afectan directamente el crecimiento vegetal.

2.1.1. Oxígeno y aireación

Las plantas respiran consumiendo O_2 y produciendo CO_2 , para su óptimo metabolismo es necesario un adecuado intercambio de oxígeno entre las raíces y la atmosfera del suelo. Este intercambio es frecuentemente llamado aireación.

La difusión del O_2 al sitio donde ocurre la respiración depende del gradiente de concentración y del coeficiente de difusión del gas. Las moléculas de oxígeno difunden desde la atmósfera hacia el suelo a través del espacio poroso, que es ocupado por agua y aire. El oxígeno tiene baja solubilidad y difusividad en agua, por lo que el suministro de oxígeno a las raíces depende de la existencia de un sistema continuo de poros ocupados por aire.

La conectividad de los poros, su distribución del tamaño y la posición topográfica son propiedades que afectan directamente la aireación del suelo,

por modificar la velocidad de difusión de oxígeno en el suelo y el drenaje del mismo. Por lo tanto, estos factores tienen un efecto indirecto sobre el crecimiento vegetal.

2.1.2. Temperatura

Los procesos metabólicos son definitivamente afectados por la temperatura, por lo que es un importante factor en la producción de los cultivos. La proporción de la radiación neta que es utilizada para almacenaje de calor en el suelo depende de la estructura del suelo y de su contenido de humedad (Letey, 1985).

2.1.3. Resistencia a la penetración

Los mecanismos que permiten crecer a las raíces en un medio poroso son la deformación de la estructura del medio (fracturándolo y/o comprimiéndolo) y/o la penetración de los canales y poros ya existentes, de un tamaño mayor al de las raíces (Wiersum, citado por Martino, 2001).

Según Russell (1977), para que la penetración de las raíces no se vea limitada por el suelo, es necesario que éste tenga un número suficiente de poros continuos o espacios vacíos entre los agregados de suelo, que sean lo suficientemente grandes para que las raíces penetren libremente o que puedan ser expandidos ejerciendo una presión relativamente baja. Así, que las raíces continúen creciendo en un medio poroso en el cual los poros son menores a su diámetro, sólo es posible si éstas son capaces de ejercer presión suficiente como para expandir dichos poros.

La compactación del suelo reduce el volumen ocupado por los poros, especialmente aquellos de mayor diámetro. La compactación causa una mayor resistencia mecánica del suelo e impedancias a la extensión radicular, modificando también el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el suelo, y las características de la curva de retención de agua (Russell, 1977).

La compactación implica varios cambios en el crecimiento vegetal, los cuales son tanto morfológicos (cambio en la longitud y diámetro de las raíces, dirección de crecimiento, contorsión de raíces y alteración del macollaje), como osmóticos (aumento de la concentración de azúcares e incremento en la presión de turgencia, aumento del exudado de diferentes sustancias). Estos

cambios son consecuencia de procesos mecánicos y están además regulados por mecanismos hormonales (Martino, 2001). A pesar de esto, según Russell (1977) las impedancias mecánicas que pueden restringir el crecimiento radicular no reducen necesariamente el rendimiento de los cultivos.

Por lo tanto la compactación afecta el crecimiento vegetal de manera indirecta por modificar, entre otros factores, la resistencia mecánica del suelo.

2.1.4. Agua

El agua no sólo gobierna la condición física del suelo, sino que puede afectar también la condición química y biológica del mismo, como la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y la actividad de los microorganismos.

El agua ocupa el espacio poroso del suelo, y es retenida en la matriz del suelo por varios tipos de fuerzas. El potencial de agua en el suelo se refiere a la energía con la cual el agua es retenida, y consecuentemente la energía que es necesaria para ser absorbida por parte de las plantas (Martino, 2001). Esta energía es baja cuando el contenido de humedad es cercano a la saturación, y se incrementa en la medida en que el suelo se seca. La relación entre el contenido de humedad -expresado como el porcentaje del volumen del suelo que está ocupado por agua- y el potencial de agua en el suelo -expresado como la cantidad de energía requerida para llevar esa agua al estado libre- es una propiedad fundamental de un suelo, conocida como la curva característica de retención de humedad (Hamblin, Hanks, citados por Martino, 2001).

Sólo una fracción del agua presente en el suelo puede ser utilizada por las plantas, existen diferentes modelos que buscan definir esta fracción (Asgarzadeh et al., 2011). De acuerdo al concepto clásico, el cual fue propuesto por Veihmeyer y Hendrickson, citados por Asgarzadeh et al. (2011), la humedad disponible es la comprendida entre dos puntos notables de la curva característica de retención de humedad: capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

A modo de resumen, de estas cuatro condiciones que afectan directamente el crecimiento vegetal, el agua es el factor dominante y controlador. La densidad aparente, el tamaño y la distribución de los poros

afectan la relación entre el agua y las otras dos propiedades, aireación y resistencia mecánica a la penetración. La relación entre el contenido de agua y la aireación es opuesta a la relación entre el contenido de agua y la resistencia mecánica. Al aumentar el contenido de agua baja la aireación lo que es indeseable, pero decrece la resistencia mecánica a la penetración lo que es deseable.

2.2. CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

A pesar de su importancia el concepto de calidad física de suelo no tiene una única definición. Entre las existentes se destaca la definición propuesta por Topp et al. (1997), quienes definen un suelo con buena condición física de la siguiente manera: por un lado es aquél lo suficientemente “fuerte” como para mantener una buena estructura, sostener el cultivo y resistir la erosión y la compactación; pero a su vez es también lo suficientemente “débil” como para permitir el crecimiento radicular y la proliferación de flora y fauna. Un suelo con buena calidad física también presenta características de transmisión y almacenamiento de fluidos que le permiten sostener las proporciones correctas de agua, nutrientes disueltos y aire, para tener el máximo rendimiento del cultivo y a la vez una mínima degradación ambiental (Topp et al., citados por Reynolds et al., 2002).

2.3. INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible. Por lo tanto un indicador permite cuantificar, medir y comunicar, en forma comiguales pensible información relevante (Cantú et al., 2007).

Es creciente el interés por disponer de indicadores de calidad de suelo que logren integrar los procesos que en éste ocurren y a su vez que cumplan con las siguientes condiciones: que sean aplicables bajo diferentes condiciones de campo y que respondan a cambios en el uso del suelo y prácticas de manejo (Doran y Parkin, citados por Campitelli et al., 2010). El objetivo de un indicador de calidad de suelo es evaluar la sustentabilidad del uso del recurso. En una

revisión realizada por Bastida et al. (2008) sobre indicadores de calidad de suelo, se destaca la complejidad del tema dada la multiplicidad de factores que es necesario considerar para establecer la calidad de suelo.

En el cuadro 1, se muestran los principales indicadores utilizados para estimar la calidad física del suelo.

CUADRO 1: Resumen de principales indicadores de calidad física de suelo.

Parámetro y unidades de medida	Definición del parámetro	Propiedad física medida
Carbono orgánico del suelo, mg kg⁻¹	Cantidad de carbono en el suelo derivado de fuentes orgánicas	No es estrictamente un parámetro de calidad física, pero sí afecta varios de sus aspectos
Densidad aparente del suelo, Mg m⁻³	Masa de sólidos del suelo por unidad de volumen de suelo	Indicador de la compactación de la matriz del suelo. También utilizado en el cálculo de otros parámetros volumétricos
Porosidad total del suelo, m³ m⁻³	Porosidad=(1- Dap/Dr) donde generalmente se asume que Dr = 2,65 Mg m ⁻³	Volumen total de poros del suelo, incluyendo macroporos, poros de la matriz y poros ocluidos
Macroporosidad del suelo, m³ m⁻³	Porcentaje de poros contenidos a la succión de -100 mm	Volumen de poros con diámetros equivalentes mayores que 300 µm
Capacidad de campo, m³ m⁻³	Porcentaje de agua contenido a succión de -10 Pa	Índice de capacidad de retención de agua en el suelo
Punto de marchitez permanente, m³ m⁻³	Porcentaje de agua contenido a succión de -1.500 Pa	Estimación del contenido hídrico residual en el suelo no disponible fácilmente para las plantas
Agua disponible, m³ m⁻³	AD= CC – PMP	Capacidad del suelo de retener agua fácilmente disponible para las plantas
Resistencia a la penetración, Mpa	Fuerza mecánica determinada con un penetrómetro de cono	Resistencia mecánica de la matriz del suelo a la penetración de un cono.

		Estimación de la resistencia mecánica que enfrentan las raíces para crecer.
--	--	---

Fuente: modificado de Reynolds et al. (2002)

POR= porosidad total del suelo Dr= densidad real del suelo Dap= Densidad aparente del suelo, AD= Agua disponible, CC= Capacidad de campo, PMP= Punto de marchitez permanente.

2.3.1. El intervalo hídrico óptimo

El contenido de agua óptimo en el suelo para el crecimiento vegetal ha sido generalmente evaluado en base al concepto de agua disponible, es decir considerando capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Sin embargo, el crecimiento vegetal puede ser afectado por la aireación o la resistencia mecánica a la penetración, particularmente en suelos de pobre estructura y/o alta densidad. En estos suelos, posiblemente la tasa de difusión del oxígeno se vea limitada a CC y el contenido de agua debe ser menor para mantener una adecuada tasa de difusión del oxígeno. En el otro extremo de la escala, la resistencia mecánica puede restringir el crecimiento vegetal a un contenido de agua superior que PMP (Letey, 1985). En otras palabras el crecimiento vegetal para suelos con igual cantidad de AD, puede ser limitado por pobre aireación y/o por alta resistencia mecánica, como consecuencia de altos valores de densidad aparente y/o pobre estructuración del suelo.

Consecuentemente, el Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) o “least limiting water range” (LLWR) es propuesto por Letey (1985) como un indicador de calidad física del suelo, que integra en un único parámetro los efectos de la aireación, resistencia a la penetración y las características de la retención de agua en el suelo sobre el crecimiento vegetal.

El IHO es determinado como el rango de humedad en el suelo definido en el extremo húmedo, por el menos húmedo de cantidad de agua en la cual comienzan a darse limitantes por aireación ($\theta_{10\%aire}$) y cantidad de agua a capacidad de campo (θ_{CC}), mientras que en el extremo seco, lo define el más húmedo de cantidad de agua a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) y cantidad de agua a partir de la cual la resistencia a la penetración limita el crecimiento radicular ($\theta_{RP=2MPa}$).

De esta manera existen cuatro formas de calcular el IHO dependiendo de qué valores toman sus límites (Wu et al., 2003):

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

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

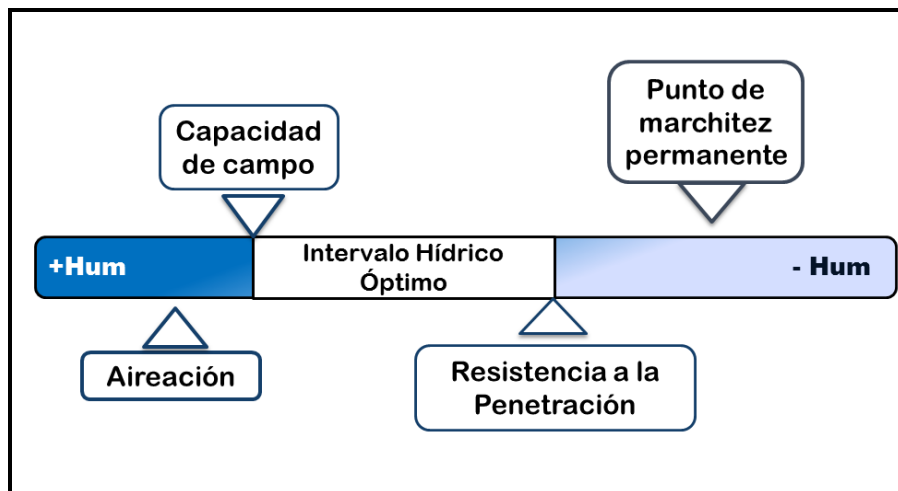
$$\text{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{RP=2 \text{ MPa}}$$
3. Si $(\theta_{10\% \text{aire}} \leq \theta_{CC})$ y $(\theta_{RP=2 \text{ MPa}} \leq \theta_{PMP})$:

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

$$\text{IHO} = \theta_{10\% \text{aire}} - \theta_{RP=2 \text{ MPa}}$$

La figura 1 muestra una representación gráfica del IHO correspondiente al caso dos de las ecuaciones de Wu et al. (2003).

FIGURA 1: Representación gráfica del Intervalo Hídrico Óptimo, corresponde al caso dos de las ecuaciones de Wu et al. (2003).



+Hum: Representa mayor contenido e humedad en el suelo y – Hum: Representa menor contenido de humedad en el suelo

El IHO es un indicador que se destaca dentro de los nuevos abordajes metodológicos propuestos para evaluar la calidad física del suelo (Leao et al., 2004). Diversos estudios resaltan la eficiencia del IHO en diferenciar los efectos de distintas prácticas de manejo como rotaciones, sistemas de laboreo, sistemas de fertilización, tráfico de maquinaria y sistemas de pastoreo (Da Silva et al. 1994, Tormena et al. 1999, Leao et al. 2004).

Otros usos del IHO han sido propuestos por Benjamin et al. (2003), quienes indican que puede ser una herramienta útil para decidir los cronogramas de riego y tomar decisiones de laboreo como forma de remediar problemas de compactación. También plantean que analizado en conjunto con otras variables es un indicador útil para predecir y/o explicar rendimientos de un cultivo. En este sentido, el IHO ha sido evaluado en la interpretación de respuestas en crecimiento vegetal con resultados significativos por varios autores (Da Silva y Kay 1996, Benjamin et al. 2003, Verma y Sharma 2008). Zou et al. (2000), plantean que el uso del concepto del IHO permite identificar los factores que controlan la calidad física del suelo, estudiado en términos de crecimiento vegetal, al determinar cuál de los límites del IHO es el más restrictivo en cada caso en particular. El uso del IHO, con énfasis en el límite inferior, se ha utilizado también para caracterizar la repuesta de cultivares al déficit hídrico (Ray y Sinclair, citados por Kay et al., 2006). Dichos aspectos son abordados con mayor detalle en la sección 2.3.1.5.

Una propuesta alternativa en el uso del IHO es la realizada por Topp et al. (1994) quienes presentan el uso de la relación entre este indicador y el agua disponible (IHO/AD). Se propone a la relación IHO/AD como un indicador estructural que permitiría comparar diferentes tipos de suelos, al ser independiente del tamaño y la distribución de las partículas.

2.3.1.1. Factores intrínsecos del suelo que afectan los valores del IHO

Dada la complejidad de los factores que influyen en el IHO y a la falta de estudios que analicen éstos, en esta sección se discute en primer lugar los factores que influyen en cada uno de sus límites para luego entender cómo afectan al indicador.

Factores que afectan al agua disponible

Muchos factores influyen la capacidad de retención de agua de un suelo. La misma está determinada por la distribución y el tamaño de las partículas, y por la estructura y materia orgánica del suelo (Silva Barboza, 2011).

La influencia que tenga cada uno de estos factores está determinada por la parte de la curva de retención de agua del suelo que se considere. Así, a altos contenidos de agua (cercano a θ_{cc}) los fenómenos de capilaridad son importantes, y la curva depende de la distribución y el tamaño de los poros. Es entonces función de la densidad y la porosidad del suelo, por lo que está determinado por la estructura del suelo.

Cuando el contenido de agua es reducido (cercano a θ_{PMP}), sin embargo, la curva es prácticamente independiente de la estructura del suelo ya que es función principalmente del fenómeno de adsorción, el cual está determinado por la textura y el tipo de minerales arcillosos presentes en el suelo (Urach, citado por Silva Barboza, 2011). Esto implica que el límite asociado a θ_{PMP} , pueda ser modificado sólo en pequeñas proporciones por cambios en el manejo del suelo (Arkin y Taylor, 1981).

Factores que afectan a la resistencia a la penetración

En una revisión realizada por Martino (2001), se afirma que la resistencia a la penetración de las raíces está condicionada por las propiedades macroscópicas del suelo, principalmente la densidad aparente, la textura y el contenido de humedad.

Una mayor Dap implica una disposición más apretada de las partículas constituyentes del suelo lo que determina una reducida compresividad y elevada fricción interna del suelo (Taylor et al., 1966).

Tanto la RP como la fuerza de fricción del suelo aumentan con la cementación del suelo (Byrd y Cassel, 1980), es decir con los contenidos de arcilla y materia orgánica. Así, los suelos de texturas finas, debido a su alta fricción interna entre partículas y su cohesividad desarrollan niveles de RP altos. Sin embargo, los suelos arcillosos tienen usualmente valores de Dap menores y retienen mayores contenidos de humedad que los suelos arenosos, factores que disminuyen la RP.

En cuanto a la humedad, Martino (2001) plantea que los valores mínimos de RP ocurren cuando el suelo tiene los máximos contenidos de humedad, y a medida que el suelo se seca la RP aumenta exponencialmente hasta alcanzar un valor máximo, este incremento en la RP debido al secado del suelo es tanto más marcado cuanto mayor es la densidad aparente.

Factores que afectan a la aireación del suelo

La aireación del suelo esta determinada por todo aquello que modifique la difusividad del O₂. Siendo el tamaño, la cantidad y la continuidad de los poros del suelo factores que determinan la aireación a un determinado contenido de humedad.

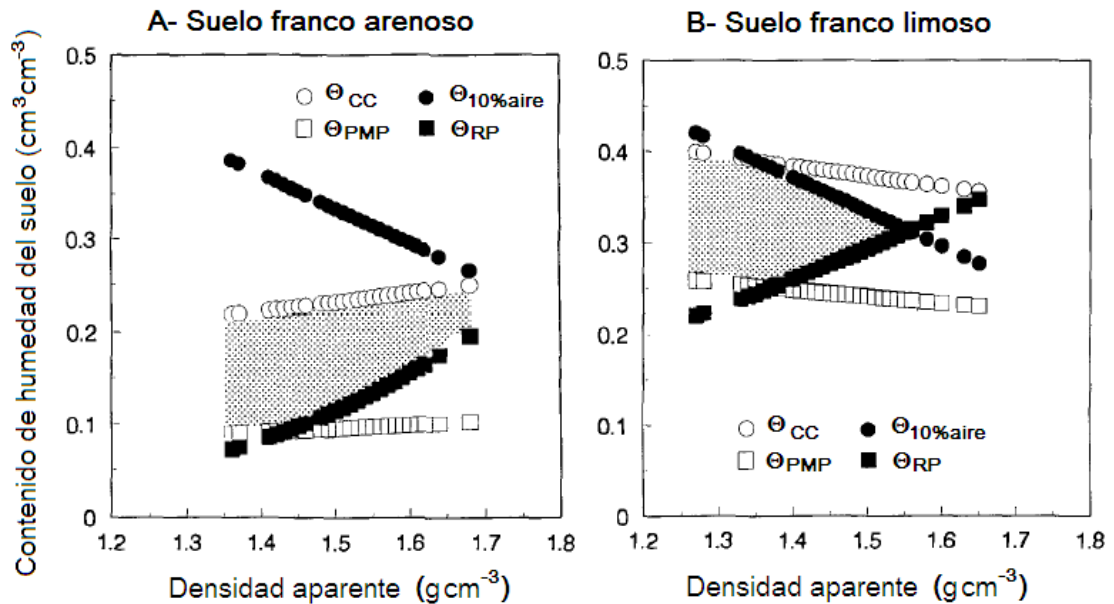
El limite que considera la aireación del suelo es $\theta_{10\%aire}$, el cual es función directa de la porosidad total del suelo. Como una simplificación la porosidad puede ser compuesta por dos partes: porosidad textural y porosidad estructural (Guerif et al., citados por Dexter, 2004). La porosidad textural ocurre entre las partículas de los minerales primarios, mientras que la estructural depende de las microfisuras, fisuras, bioporos y la macroestructura. La suma de ambas porosidades puede ser determinada mediante la Dap del suelo.

Variación de los límites del IHO con la textura y Densidad aparente

En base a lo anterior se puede afirmar que todos los limites del IHO son afectados por cambios en la densidad aparente y la textura del suelo, en esta sección se analiza entonces el efecto de estos factores sobre el IHO basándose en los estudios realizados por Da Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999).

La figura 2 muestra los resultados del estudio de Da Silva et al. (1994) donde se ve el efecto de la Dap sobre los límites del IHO, para dos suelos de texturas contrastantes.

FIGURA 2: Efecto de la Densidad aparente sobre los límites que componen el Intervalo Hídrico Óptimo, para dos tipos de suelo



Fuente: modificado de Da Silva et al. (1994). Donde el área sombreada representa el IHO. θ_{CC} = Contenido de humedad a capacidad de campo θ_{PMP} = Contenido de humedad a punto de marchitez permanente, $\theta_{10\%aire}$ = Contenido de humedad a 10% de poros con aire y $\theta_{RP=2 MPa}$ = Contenido de humedad a RP igual 2 MPa.

Si bien la Dap afecta a todos los límites del IHO su efecto es menor sobre θ_{CC} y θ_{PMP} , que sobre la impedancia mecánica del suelo y la aireación, los cuales se muestran como más sensibles a cambios en la Dap, por tanto el IHO es afectado en mayor medida por los cambios en la estructura del suelo que el AD (Da Silva et al. 1994, Betz et al. 1998, Tormena et al. 1999, Zou et al. 2000).

La textura del suelo determina tanto el valor de cada uno de los límites a una determinada Dap, como la sensibilidad de los mismos a cambios en la Dap, lo que se observa por ejemplo al comparar las pendientes de RP en función de Dap, para suelos de texturas contrastantes (figura 2).

Los suelos de textura fina implican una mayor adsorción del agua y por tanto un θ_{PMP} mayor. Con la textura fina también aumentan los límites de θ_{CC} y

$\theta_{RP=2MPa}$. Sin embargo, el límite de $\theta_{10\%aire}$ no es modificado por la textura, pues esta variable es calculada directamente a partir de la Dap.

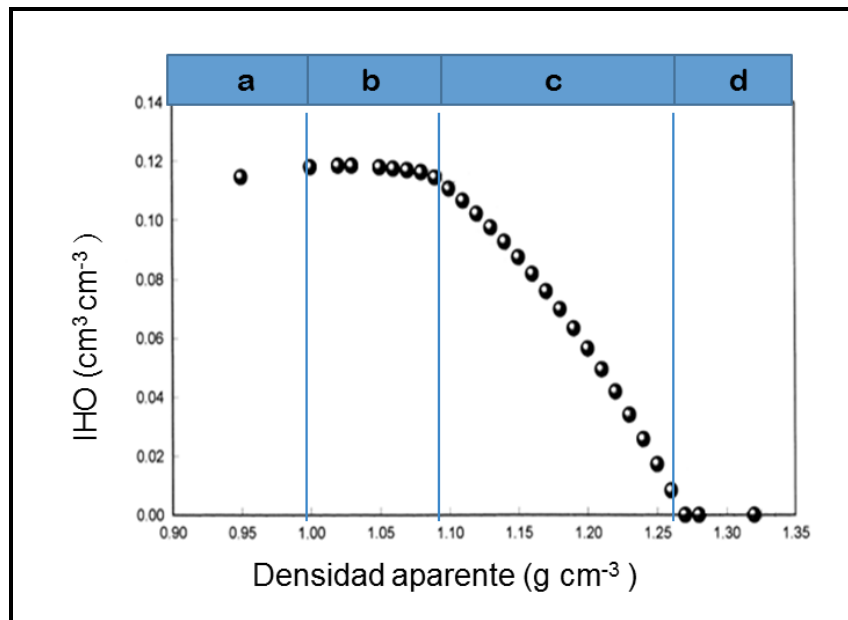
Por lo tanto la textura del suelo es una de las determinantes de los límites que conforman el IHO. Para el ejemplo mostrado (figura 2) en ambos suelos el límite inferior es $\theta_{RP=2MPa}$, para un amplio rango de densidades. Sin embargo el límite superior es θ_{CC} en el suelo franco arenoso, mientras que en el suelo franco limoso el límite superior es $\theta_{10\%aire}$.

Variación del IHO con Dap

La íntima relación entre el IHO con la estructura y “calidad” del suelo ha sido ampliamente estudiada por varios autores, esta relación ha permitido que se desarrollen ecuaciones de edafotransferencia que permiten establecer el IHO a partir de la Dap (Silva et al., citados por Orellana, 2009).

En un trabajo realizado por Tormena et al. (1999) sobre un suelo arcilloso, se estudió el comportamiento del IHO en relación a la Dap (Figura 3).

FIGURA 3: Relación entre el Intervalo hídrico óptimo y la Dap de un suelo, para un suelo arcilloso.



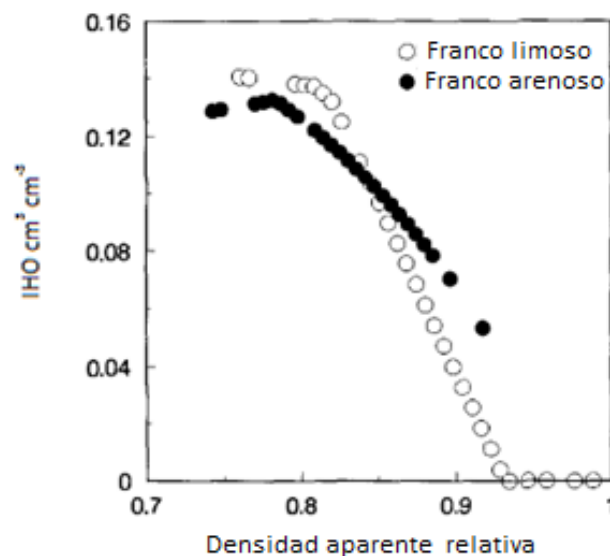
Fuente: modificado de Tormena et al. (1999).

Este comportamiento es similar al encontrado por otros autores (Da Silva et al. 1994, Betz et al. 1998, Leao et al. 2004, Klein y Camara 2007)

Tomando este modelo como referencia es posible dividir la curva en cuatro sectores: a) un primer sector (que en el ejemplo corresponde hasta una Dap cercana a uno), en la cual aumentos en la Dap provocan pequeños aumentos en el IHO, b) un segundo sector en el cual aumentos en Dap prácticamente no provocan cambios en el IHO; c) un tercer sector a partir del cual cambios en la Dap provocan fuertes disminuciones en el IHO (que en el ejemplo ocurre a partir de una Dap de 1,1 g/cm³); d) por último un sector a partir del cual el IHO se hace cero, que se da a partir de la Dap definida como crítica por Da Silva y Kay (1997b).

Da Silva et al. (1994) en el trabajo ya citado en este capítulo, también analizan el efecto de la textura sobre el IHO. Los resultados se muestran en la figura 4.

FIGURA 4: Relación entre el Intervalo hídrico óptimo y la Dap para dos suelos, franco arenoso y franco limoso.



Fuente: modificado a partir de Da Silva et al. (1994).

Las formas de las curvas son similares entre si y a la curva antes mostrada, presentando pequeñas diferencias explicadas mayormente por variaciones texturales.

En este caso en la región (a), para el suelo de textura gruesa se observan pequeños aumentos en el IHO, en cambio en el suelo de textura mas fina este fenómeno no se da. Los aumentos del IHO en esta región para suelos de textura gruesa están explicados por aumentos en AD, que en este caso y a estas densidades es igual al IHO. Para los suelos de textura fina, si bien el IHO también es igual a AD, estos aumentos no se observan. Por otro lado en la región c) se observa una disminución marcada del IHO con aumentos de la Dap, con una tasa mayor para el suelo de textura fina.

Es posible explicar esta figura observándola en conjunto con la figura 2, que permite deducir que los límites que componen el IHO son diferentes, lo que explica las distintas tasas de disminución del IHO.

A modo de resumen, el IHO es sensible a todo aquello que afecte el valor y/o el comportamiento de alguno de sus límites. Así, en una revisión realizada por Tormena et al. (1999) se encuentra que el IHO es afectado por el carbono orgánico, la textura y Dap.

2.3.1.2. Valores críticos de los parámetros que constituyen el IHO

En general los valores críticos considerados límites para la determinación del IHO son compartidos por la mayoría de los autores. Si bien estos valores han surgido de estudios científicos específicos, también son objeto de cuestionamientos de parte de los investigadores. Los valores críticos considerados límites del IHO, si bien son compartidos por la mayor parte de los autores, son valores empíricos generalizados que surgen de la investigación. Estos valores son cuestionados a nivel científico ya que en condiciones particulares de suelo y/o cultivos están pobremente relacionados con el crecimiento vegetal y a los fenómenos que con éstos se buscan explicar. Así, Zou et al. (2000) indican como una debilidad en el concepto del IHO el hecho de considerar los límites del indicador independientes del tipo de suelo, la especie vegetal y otras variables (como por ejemplo la temperatura). Este autor señala como otra debilidad del IHO el hecho de que se asumen los valores límites

como impuestos repentinamente y no de manera gradual. Da Silva et al. (1994), plantean la existencia de evidencia numerosa acerca de que el decrecimiento en el crecimiento vegetal varía en forma continua con el potencial de presión, la resistencia a la penetración y la aireación, y por lo tanto la respuesta de las plantas a la variación en el contenido de agua debe ser considerada como gradual.

La importancia de la correcta elección de los valores críticos del IHO ha sido reportada por Da Silva et al. (1994), quienes realizan un análisis de sensibilidad del IHO a la variación de los valores críticos de sus límites. En base a sus resultados plantean que los límites de aireación, CC y RP deben ser evaluados en base a condiciones de campo usando la respuesta de los cultivos, antes de que el IHO pueda ser considerado como un indicador de calidad de suelo para el crecimiento de los cultivos.

Límite de resistencia a la penetración

La herramienta más ampliamente usada para medir la resistencia mecánica del suelo es el penetrómetro de cono de penetración estática (Taylor, citado por Letey, 1985). Sin embargo, los valores de RP medidos con un penetrómetro son mayores que los que las raíces experimentan, debido a que estas últimas poseen la capacidad de crecer en forma no lineal y sortear zonas de mayor resistencia en el suelo. Además las raíces poseen mecanismos para reducir la fricción a través de la secreción de lubricantes. En una revisión realizada por Clark et al. (2003), se indica que la estimación del penetrómetro superó entre 1,8 a 7,5 veces la magnitud de la RP experimentada por las raíces.

La mayor parte de los autores revisados citan al experimento de Taylor et al. (1966) como fuente del valor crítico de resistencia a la penetración usado.

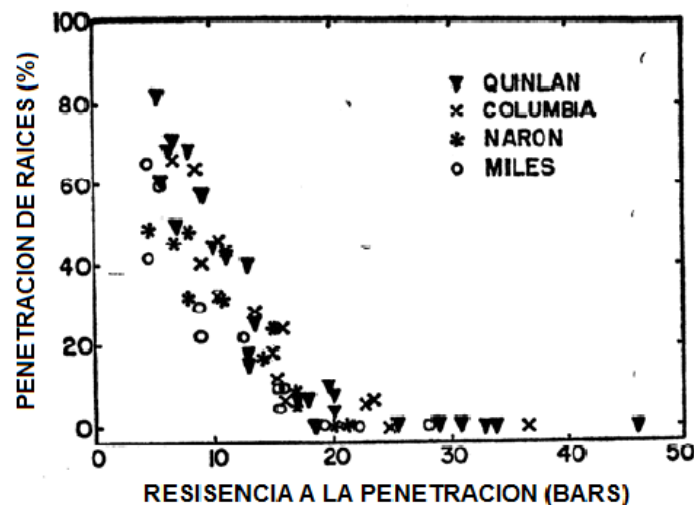
Taylor et al. (1966) afirman que la resistencia a la penetración depende del método usado para determinarla, concordando con lo dicho anteriormente, sin embargo cuando se usa un método determinado, se pueden obtener datos consistentes que relacionan la resistencia del suelo con diferentes aspectos relacionados con el crecimiento vegetal. Esto puede explicar por qué en la metodología más extendida para la determinación del IHO, que utiliza el valor crítico de Taylor et al. (1966), se realiza con penetrómetro de cono sin corrección de los valores obtenidos.

En dicho trabajo original se analizó el porcentaje de penetración de las raíces de algodón, en función de la resistencia de cuatro suelos de diferentes texturas. Los resultados del trabajo se muestran en la figura 5. Los autores concluyen que no hay penetración de raíces a partir de los 2,5 MPa, y que una resistencia a la penetración mayor a 2 MPa (20 bars) limita el crecimiento. Según Bowen (1981), para suelos de texturas que van desde franco limoso a franco arenoso, la relación entre la RP y la penetración de las raíces de algodón sigue una relación similar a la mostrada en la figura 5.

Otros experimentos realizados sobre distintos suelos, son citados por Taylor et al. (1966), donde la relación RP y crecimiento radicular tiene comportamiento curvilíneo para todos y similar al mostrado en la figura 5, a pesar de sus diferencias en Dap y RP.

Así, el valor crítico de RP más difundido es de 2 MPa (Da Silva et al. 1994, Da Silva y Kay 1996, 1997b, Betz et al. 1998, Tormena et al. 1999, Wu et al. 2003, Verma y Sharma 2008, Pereira et al. 2010, Calonego y Rosolem 2011).

FIGURA 5: Penetración de las raíces primarias de algodón en función de la resistencia mecánica del suelo, para cuatro suelos.



Fuente: Taylor et al. (1966)

Por otra parte, se han encontrado diferencias con respecto al valor crítico según las especies. Por ejemplo, una RP de 0,7 MPa redujo la elongación de las raíces de algodón en un 50%, mientras en el maní fueron necesarios 2 MPa para reducir la elongación de las raíces un 50% (Taylor y Ratcliff, citados por Bowen, 1981). Klein y Camara (2007), encontraron que para el cultivo de soja $\Theta_{RP=2\text{MPa}}$ no era limitante para el rendimiento, lo que concuerda con lo revisado por los autores donde se plantea que en soja el valor crítico sería $\Theta_{RP=3\text{MPa}}$.

En base a esto, si se pretende usar el IHO como indicador relacionado con el crecimiento vegetal, la elección del valor crítico de RP debería considerar el cultivo (Bowen, 1981).

Límite de capacidad de campo

La capacidad de campo (CC) se refiere a la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener, es el agua remanente luego de que ha drenado el agua gravitacional y la tasa de drenaje se hace despreciable, a partir de un estado saturado. Arbitrariamente se ha fijado en dos días el tiempo requerido por un suelo saturado para alcanzar este estado, sin embargo esto no es válido para todos los suelos (Baver et al., 1972). Baver et al. (1972), afirman que hay una debilidad en el concepto de CC en no fijar lo que considera drenaje despreciable en función de las características de drenaje del perfil.

Como el agua gravitacional no tiene, entonces, una definición estricta desde el punto de vista de la física de suelos, se han realizado muchos trabajos para relacionar la CC con la retención de agua a un potencial matricial dado (Baver et al., 1972). Se han introducido valores de referencia y generalmente se corresponde a potenciales de matriz de entre -0,1 y -0,5 MPa (Asgarzadeh et al., 2011). Colman, citado por Mohammadi et al. (2010), mostró que el potencial mátrico de un suelo inicialmente saturado luego de drenada el agua gravitacional, se aproxima a -0,33 MPa. Si bien según Baver et al. (1972), debe considerarse a su vez que la retención de agua en un perfil depende de las propiedades de transmisión de agua de todo el perfil y de los gradientes hidráulicos, más que del estado energético del agua en un punto del perfil.

La mayor parte de los autores revisados utilizan -0,01 MPa como potencial de matriz a CC y citan al trabajo de Haise et al. (Da Silva et al. 1994, Da Silva y Kay 1996, 1997a, 1997b, Betz et al. 1998, Tormena et al. 1999, Wu

et al. 2003, Verma y Sharma 2008, Pereira et al. 2010, Calonego y Rosolem 2011).

El uso de la CC como límite para el IHO ha sido objetado debido a que contenidos de agua superiores a este punto no implican por sí solos limitantes al crecimiento vegetal (Mohamadi et al., 2010). Cuando por riego, lluvia o anegamiento se excede ese contenido, incluir CC tiene poco significado, pero cuando el contenido de humedad es menor, la CC puede ser un factor significativo para el crecimiento vegetal.

Límite de punto de marchitez permanente

El punto de marchitez permanente (PMP) es el mínimo contenido de humedad al cual las plantas pueden crecer. Este contenido hídrico es generalmente relacionado a un potencial matriz cercano a $-1,5$ MPa para la mayoría de los cultivos (Hillel, 1980). Sin embargo, según Lawlor y Newman, citados por Rusell (1977), la extensión radicular comienza a disminuir a contenidos hídricos más altos, comúnmente alrededor de $-0,05$ MPa, aunque el crecimiento de las raíces continúe hasta que el potencial caiga a valores de -1 MPa o menores.

Por otro lado, según Slatyer, citado por Rusell (1977) el PMP no puede ser considerado como una constante, ya que el marchitamiento de las plantas depende de la tasa de transpiración así como de la presión osmótica de las células, lo que está determinado por el cultivo en consideración.

Desde el punto de vista práctico, el concepto de PMP en situaciones de campo tiene la limitante de no considerar la capacidad de las plantas de obtener agua desde zonas adyacentes a la zona radicular, cuando ésta se encuentra a valores de PMP.

Límite de punto de aireación

Para la construcción del el valor crítico de aireación más ampliamente usado es el de 10% de poros con aire (Da Silva et al. 1994, Da Silva y Kay 1996, 1997a, 1997b, Betz et al. 1998, Tormena et al. 1999, Zou et al. 2000, Wu et al. 2003, Verma y Sharma 2008, Pereira et al. 2010, Calonego y Rosolem 2011). Este valor surge del estudio de la relación entre la difusividad del O_2 y la cantidad de poros, la cual es directa y negativa, llegando a valores de 10 a 12%

de poros con aire a los que la difusividad del O_2 se hace cero (Grable y Siemer, 1968). Sin embargo, no considerados los resultados de suelos no compactados y con mayores tamaños de agregados, en los cuales la cantidad de poros con aire relacionada a una nula difusividad de O_2 fue de 18 a 29%.

Sin embargo, el valor crítico de aireación no es una característica invariable del suelo sino que depende de: a) La trama porosa interconectada, libre de agua; b) la profundidad a la cual se estudia el intercambio gaseoso; c) la demanda de oxígeno por las raíces y la biota edáfica, que dependen de la temperatura y la masa radical¹. A su vez, Grable y Siemer (1968) sugieren que el valor crítico de aireación también depende de la densidad aparente y del tamaño de los agregados. En consecuencia, no es posible predecir una aireación mínima para los cultivos, en base a la cantidad de poros con aire solamente (Grable y Danielson, citados por Grable y Siemer, 1968). Como alternativa, se ha propuesto la medición de la tasa de difusión de oxígeno hacia electrodos de platino insertados en el suelo para determinar el estado de aireación del mismo (Lemon y Erickson, citados por Martino, 2001).

Por ultimo la respuesta a la baja aireación depende del tipo de cultivo. Por ejemplo el maíz y muchos de los cultivos mesotípicos se comportan con cierto grado de resistencia a condiciones de aireación reducidas (Letey et al., citados por Grable y Siemer, 1968). Los cultivos forestales, por otro lado, requieren contenidos de O_2 en el suelo superiores al 10% para obtener una adecuada tasa de respiración y crecimiento de las raíces (Daubenmire, citado por Donoso, 1997). En este sentido Pilatti y Orellana (2000) proponen aumentar el valor crítico de aireación para aquellos cultivos sensibles.

2.3.1.3. Metodologías para estimar el IHO

Se han propuesto varias alternativas para calcular los límites del IHO. En esta sección se busca resumir las metodologías más difundidas.

Resistencia a la penetración

¹ Pilatti, M.A.; Orellana, J.; Imhoff, S.; Pires Da Silva, A. s.f. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo (en prensa).

Para la determinación de $\theta_{RP=2MPa}$ se propone tomar muestras indisturbadas, llevarlas a diferentes contenidos de humedad y determinar a cada una de ellas la RP con el penetrómetro de cono. La metodología propuesta por Zou et al. (2000) realiza un ajuste de los datos mediante una regresión con el contenido volumétrico de agua y la RP, seleccionando el modelo con mayor significancia estadística. Da Silva et al. (1994) sin embargo, proponen el ajuste según la función publicada por Busscher, citado por Da Silva et al. (1994), en la cual se relaciona la resistencia a la penetración con la densidad aparente y el contenido hídrico, siendo esta la metodología más difundida para determinar el límite de resistencia a la penetración. A partir de cualquiera de estas funciones se estima el contenido de humedad volumétrico en el que la RP se iguala al valor crítico.

Agua disponible

La metodología más directa para el cálculo de estos límites es la propuesta por Benjamin et al. (2003), Wilson et al. (2008), que consiste en equilibrar las muestras saturadas a las tensiones correspondientes a CC y PMP, utilizando ollas de presión, y determinar el contenido de humedad a cada una de esas tensiones.

Da Silva et al. (1994) proponen dividir las muestras en grupos, para ser equilibradas en ollas de presión a diferentes potenciales de matriz de suelo. Luego se realiza un ajuste con los datos de contenido hídrico y presión de matriz del suelo, utilizando la fórmula de Ross et al., citados por Da Silva et al. (1994), con la cual es posible predecir los contenidos hídricos del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Límite de aireación

Para la estimación de $\theta_{10\% \text{aire}}$, la metodología más usada es la propuesta por Da Silva et al. (1994), que consiste en el cálculo del 10% de la porosidad total a partir de la Dap.

Wu et al. (2003) proponen como un parámetro alternativo para estimar la aireación a partir de la tasa de difusión del oxígeno, ODR. La medición se realiza mediante electrodos de platino en muestras con distintos contenidos hídricos, se determina así la relación cuantitativa entre el ODR y el contenido de agua, a partir de la cual se estima la humedad para el valor crítico de ODR.

2.3.1.4. Sensibilidad del indicador ante las prácticas de manejo

En la sección 2.3.1.1. de este trabajo se mencionaron algunos factores intrínsecos del suelo que afectan y determinan los valores del IHO. Se sabe que las distintas prácticas de manejo tienen efecto sobre esos factores. Esta sección es una revisión de estudios de los efectos de prácticas de manejo sobre el IHO.

Un factor importante a considerar es que las prácticas de manejo pueden también tener efectos sobre el contenido de agua del suelo, modificando la variabilidad temporal en el contenido de agua. Por lo tanto, las prácticas de manejo pueden modificar la magnitud del IHO y a su vez la frecuencia con la que el contenido de agua del suelo cae fuera de este, lo que es independiente de la magnitud del indicador (Da Silva y Kay, 1997a). Es entonces concebible que las prácticas de manejo afecten el contenido de agua del suelo de forma que compense su efecto sobre la estructura. Sin embargo este factor no es considerado por los autores al analizar el efecto de prácticas de manejo, por lo que no será tratado.

CUADRO 2: Resumen de los estudios realizados sobre el efecto de prácticas de manejo sobre el IHO.

Autor	Variable estudiada	Suelo	Profundidad de muestreo	Resultados obtenidos
Da Silva y Kay (1997b)	Sistemas de laboreo	Franco	5 a 7,5 cm	El impacto del laboreo en el IHO se debe al efecto en la Dap y en el contenido de CO
Carter et al. (1998)	Sistemas de laboreo	Franco-arenoso	Sin dato	El IHO en el tratamiento de vertedera y perforación directa con azada fue menor que el tratamiento con cultivador de dientes
Lapen et al. (2004)	Sistemas de laboreo, rotaciones e intensidades de tráfico de maquinaria	Franco-arcilloso	0 a 15 cm	En SD se vio una mayor limitación por aireación, especialmente bajo cultivo de maíz continuo y circulado por maquinaria Los mayores valores de RP se encontraron en las parcelas de "peor" manejo de tráfico de

				maquinaria.
Leao et al. (2004)	Sistemas de pastoreo, intensidad de pastoreo y fertilización	Areno-arcilloso	0 a 10 cm	La fertilización de mantenimiento no tiene efecto en sobre el IHO. Sistemas de pastoreo rotativo presentaron menor IHO que los sistemas de pastoreo continuo. Mayor carga significa un menor IHO, principalmente por aumento de RP.
Verma y Sharma (2008)	Rotaciones, uso de fertilizantes químicos, uso de enmiendas orgánicas	Franco-limoso y franco arcillo-limoso	15 a 18 cm	La fertilización con NP y NPK aumentaron el IHO respecto al control. Hay efecto de las rotaciones en el IHO. El agregado de enmiendas orgánicas aumenta el IHO
Pereira et al. (2010)	Sistemas de laboreo y rotaciones	Areno-arcilloso	0 a 20 cm	Bajo SD Θ_{RP2MPa} sustituyó a Θ_{PMP} como límite inferior del IHO, para todos los valores de Dap. La compactación puede tener impacto en la RP, Dap y la porosidad
Calonego y Rosolem (2011)	Sistemas de laboreo y rotaciones	Arcilloso	0 a 20 cm y 20 a 40 cm	El cincelado y algunas rotaciones en SD son efectivos como medidas de manejo para incrementar la calidad física del suelo, reportado por el IHO.

NP= Fertilización con nitrógeno y fosforo, NPK= Fertilización con nitrógeno, fosforo y potasio, SD= Siembra Directa.

Da Silva y Kay (1997b), evalúan la sensibilidad del IHO comparando tratamientos de laboreo y siembra directa, en un estudio realizado en Clinton, Ontario, Canadá. Los autores basados en que las propiedades inertes del suelo -como el contenido de arcilla, CO y la estructura del suelo- impactan el IHO de manera interactiva, estudian la relación entre el IHO y la Dap. Encuentran que laboreo del suelo no modifica la relación, y concluyen que el impacto del laboreo en el IHO se debe al efecto de esta práctica de manejo en la Dap y en el contenido de CO.

Carter et al. (1998), también evaluaron la sensibilidad del IHO frente a diferentes sistemas de laboreo. El primer tratamiento consiste en una pasada anual en primavera de arado de vertedera (20 cm de profundidad) y perforación directa con azada (5 cm de profundidad). El segundo tratamiento, más

superficial, consiste en dos pasadas con cultivador de dientes en primavera (10 cm de profundidad). Se encontraron efectos de los tratamientos sobre el valor del IHO, siendo éste significativamente menor en el tratamiento con arado y perforación directa. Esto está explicado por los efectos de los tratamientos sobre los límites del IHO, encontrando que Θ_{CC} fue significativamente menor en este tratamiento, lo que se atribuye a los mayores valores de D_{ap} . El límite de Θ_{PMP} fue similar en ambos tratamientos, lo que refleja la ausencia de efectos de la macroestructura del suelo, como fue mencionado en secciones anteriores de este trabajo. El contenido de $\Theta_{RP=2MPa}$, también fue mayor para el tratamiento con arado y perforación directa con azada, en ambos casos fue mayor al contenido de agua a capacidad de campo.

Los autores utilizan a su vez la relación IHO/AD para caracterizar los sistemas, encontrando diferencias de un 49% entre los tratamientos. Los valores del indicador son $0,35 \pm 0,154$ para el tratamiento con perforación directa con azada y $0,71 \pm 0,170$ para el tratamiento en el que se paso cultivador de dientes, mayores valores de este indicador reflejan una mejor estructura del suelo, donde el IHO es mas cercano a AD.

Lapen et al. (2004), efectuaron un estudio de los parámetros que componen el IHO, para suelos franco- arcillosos en Ontario, Canadá. Se llevaron a cabo una serie de tratamientos en los que se combinan diferentes laboreos (SD y arado de vertedera), rotaciones de cultivos (maíz-soja-trigo vs el quinto año de maíz continuo), y tráficos de maquinarias (clasificados en “mejor” y “peor”). Los suelos bajo SD tuvieron un mayor riesgo de limitación por aireación, especialmente para aquellos tratamientos con cultivo de maíz continuo y tratamiento de “peor” circulación. También fue observado, en el estrato de 5 a 10 cm, que los mayores valores de RP se encontraron en las parcelas de “peor” manejo de tráfico de maquinaria.

Leao et al. (2004), estudian el efecto del pastoreo sobre el IHO, en el área experimental de Embrapa Gado de Corte (Brasil). El experimento fue dividido en cuatro parcelas en las que se estudiaron dos sistemas de pastoreo continuo y dos sistemas de pastoreo rotativo. En el sistema de pastoreo continuo la especie presente era *Brachiaria decumbens*, los tratamientos estudiados fueron uno que recibió fertilización de mantenimiento y otro que no recibió fertilización de mantenimiento bianual. Los sistemas de pastoreo rotativo fueron sembrados con la especie *Panicum máximum*, en uno de los

tratamientos el residuo dejado después del pastoreo era entre 2,0 y 2,5 t ha⁻¹ de materia seca (R1), mientras que en el otro el residuo era entre 3,0 y 3,5 t ha⁻¹ de materia seca (R2).

Los resultados muestran que los sistemas de pastoreo continuo presentaron condiciones similares, tanto en densidad aparente como en el IHO. Esto permite a los autores concluir que la presencia o no de fertilización de mantenimiento no tiene efecto en las propiedades físicas del suelo en el sistema estudiado, lo que se contrapone con los resultados encontrados en el experimento de Verma y Sharma (2008). Ese comportamiento es atribuido a la similitud en la carga animal que tuvieron ambos tratamientos de fertilización. Los sistemas de pastoreo rotativo R1 y R2 presentaron condiciones físicas del suelo peores que los sistemas de pastoreo continuo. Este resultado se contrapone con lo esperado según un estudio realizado por Proffitt et al., citados por Leao et al. (2004) -en suelos de texturas medias a pesadas en pastoreo de ovejas- donde se encontró que la calidad física del suelo en el sistema de pastoreo rotativo era superior que en el de pastoreo continuo, y similar al tratamiento sin pastoreo. Esta diferencia puede estar explicada por que en el sistema de pastoreo rotativo en el estudio de Proffitt et al. los animales eran retirados del área cuando el suelo se aproximaba al límite de plasticidad.

Leao et al. (2004) citan el estudio de Chanasyk y Naeth, quienes también comparan sistemas de pastoreo continuo y rotativo. Estos observan que el sistema de pastoreo continuo causó mayor degradación, teniendo mayores valores de Dap y RP. Estas diferencias respecto al estudio de Leao et al. (2004) pueden atribuirse a que estos autores utilizan la misma carga animal entre los sistemas, mientras que Leao et al. (2004) utilizan menores cargas en los sistemas de pastoreo continuo. Otro factor que puede estar influenciando los resultados es la diferencia de hábito de crecimiento de las especies utilizadas en ambos sistemas. En los sistemas de pastoreo rotativo la especie era cespitosa, lo que contribuye a que el suelo quede desnudo entre las hileras y a que los animales transiten por esas aéreas, intensificando así los efectos de la compactación.

Al comparar los sistemas de pastoreo rotativo entre sí, la menor carga, el menor pisoteo y la mayor cantidad de residuos del sistema R2 pueden contribuir a minimizar la degradación de las propiedades físicas del suelo. La diferencia

de carga entre los sistemas en el período lluvioso (4,8 UG/ha en el sistema R1 y 4,12 en el sistemas R2), puede haber sido decisiva en las diferencias. El aumento de la carga causó un aumento en la Dap y una reducción del IHO, principalmente por el aumento del límite de RP.

Verma y Sharma (2008), estudian el efecto en la productividad física del suelo de: a) diferentes rotaciones, maíz-trigo, arroz-trigo, y pastos perennes (setaria y pasto de guinea); b) El uso fertilizantes químicos en el largo plazo, analizando un testigo sin fertilizar y cuatro tratamientos, N, NP, NPK y NPK + cal; c) Enmiendas orgánicas FYM, paja de trigo, biomasa de lantana.

La fertilización tiene efecto sobre la aireación, siendo la cantidad de poros con aire a una determinada humedad menor en el tratamiento con fertilización con N, el control y el tratamiento con NPK + cal. Los valores más alto se encontraron en el tratamiento NPK + enmiendas orgánicas FYM. Los efectos de los fertilizantes y las enmiendas orgánicas son manifestados mediante cambios en la Dap y en el tamaño y distribución de poros en el suelo.

La transmisión de agua por los poros fue igual estadísticamente en el control, N, NPK + cal y estadísticamente superior en los demás tratamientos. Concluyen entonces que la menor densidad y la mayor transmisión de agua por los poros, favorecen un rápido drenaje del agua del suelo, para llegar a 10% de poros con aire a contenidos de humedad relativamente altos. Los autores afirman haber encontrado efectos similares al evaluar las diferentes rotaciones de cultivos, pero no las reportan en el trabajo.

La resistencia a la penetración para un contenido de humedad dado sigue el siguiente orden: N > Control > NPK + Cal > NP > NPK > NPK + FYM, lo que es atribuido a los efectos en Dap. El agua disponible en el suelo no fue estadísticamente diferente para el control y los tratamientos N, y NPK + cal, y significativamente superior para el tratamiento NPK. El efecto de la fertilización sobre los valores del IHO es analizado para el sistema maíz-trigo, se encontró que el control fue menor que el tratamiento con N e igual que el tratamiento con NPK + cal, siendo los valores de IHO más altos en los tratamientos de NP y NPK. La fertilización con NP y NPK aumentaron el IHO cerca de 1,35 a 1,44 veces respecto al control.

Las diferentes rotaciones mostraron efectos sobre $\Theta_{10\%aire}$, que fue mayor en el tratamiento de soja-trigo, seguido por las rotaciones con pasturas, y maíz-

trigo, siendo los menores valores los del tratamiento arroz-trigo. También se encontró efecto sobre $\Theta_{RP=2MPa}$, correspondiendo el menor valor a la rotación de soja-trigo y maíz-trigo, seguido por los tratamientos que incluyen pasturas, presentando la rotación arroz-trigo los mayores valores de $\Theta_{RP=2MPa}$. En cuanto al efecto de las rotaciones sobre el IHO, se encuentra que el indicador fue capaz de diferenciar los tratamientos, con el siguiente orden: soja-trigo (IHO = 16,8%) > tratamientos con pasturas (14,4-15,5%) > maíz-trigo (13,1-15,4%) > arroz-trigo (7,5-11%).

El indicador IHO/AD mostró igual tendencia. De acuerdo con los autores, esto es explicado por la adición regular de hojas al suelo, así como la adición de residuos orgánicos que mejoran las propiedades físicas en los sistemas con mayores valores de IHO.

Verma y Sharma (2008) afirman que los sistemas que incluyen pasturas, siendo estas pasturas perennes, tienen la ventaja adicional de que no requieren operaciones de laboreo. Las operaciones de laboreo realizadas durante largos períodos de tiempo deterioran la estructura del suelo, por la ruptura física de los agregados y aceleran la oxidación de la materia orgánica del suelo.

La aplicación de enmiendas orgánicas junto con fertilizantes químicos aumenta $\Theta_{10\%aire}$ y decrece la $\Theta_{RP=2MPa}$, aumentando también el AD, por lo tanto el IHO es mayor (Verma y Sharma, 2008). Esto es mostrado para el sistema de maíz-trigo, donde el tratamiento NPK + enmiendas orgánicas es 1,3 veces mayor que el tratamiento NPK. Los autores concluyen que el efecto del agregado de enmiendas orgánicas provoca una mejora significativa en la estructura del suelo y en las propiedades hidráulicas del mismo, debido al agregado adicional de carbono orgánico al suelo.

Pereira et al. (2010), evaluaron el efecto de cultivos de cobertura en SD sobre las condiciones físicas del suelo. Los autores parten de la hipótesis de que la intensidad de uso del suelo altera la distribución y el tamaño de poros del suelo, los cuales establecen la calidad física del mismo. Así, el estudio se centra en evaluar la calidad física suelo, con distintos cultivos de cobertura previo a la siembra de maíz, en sistemas de laboreo y no laboreo, midiendo porosidad, densidad aparente y el IHO. Los tratamientos evaluados fueron laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD), este último con cultivos de

cobertura. Las especies utilizadas fueron cáñamo, millet y lablab (*Dolichos lablab* L.).

Los resultados del trabajo muestran que los sistemas en SD presentan mayor porosidad total y contenido de materia orgánica en el estrato de 0 a 5 cm, en comparación al laboreo convencional. Las macroporosidades de los sistemas lablab-SD, cáñamo-SD y laboreo convencional no se diferenciaron estadísticamente entre sí, a pesar de que los últimos dos sistemas presentaron los mayores valores de Dap. En cuanto al comportamiento del IHO, para todos los tratamientos se observó un incremento del Θ_{CC} y en menor medida del Θ_{PMP} , con el incremento de la Dap. También se observó un incremento en $\Theta_{RP=2MPa}$, y una disminución de $\Theta_{10\%aire}$, ya reportado por otros autores.

En los sistemas de SD, el límite de $\Theta_{RP=2MPa}$ sustituyó a Θ_{PMP} como límite inferior del IHO, para todos los valores de Dap. Los autores resaltan que, en concordancia con Freddi et al., citados por Pereira et al. (2010), las modificaciones en la estructura del suelo como consecuencia de las prácticas de manejo pueden resultar en mayor o menor compactación, lo que tiene impacto en la RP, la Dap y la porosidad del suelo, influenciando el crecimiento radicular y al final el rendimiento del cultivo.

Calonego y Rosolem (2011), estudian el IHO bajo una rotación con distintos cultivos de cobertura en sistemas de no laboreo, y la misma rotación en un sistema con laboreo y sin cultivos de cobertura, durante tres años consecutivos. La rotación fue triticale y girasol en el otoño-invierno seguido por un barbecho o cultivos de cobertura (millet, sorgo forrajero o cáñamo), y en verano el cultivo de soja. El tratamiento de laboreo (cincelado) fue realizado luego del cultivo de otoño- invierno en el primer año, y dejado en barbecho hasta el cultivo de verano siguiente.

En todos los tratamientos evaluados y en todas las profundidades, el IHO fue inferior al AD en el primer año del experimento, lo que es típico de suelos degradados (Letey, citado por Calonego y Rosolem, 2011). El 100% de los casos tuvo como límite inferior el $\Theta_{RP=2MPa}$ durante el primer año. En cuanto a los resultados del límite superior del IHO, sólo los tratamientos de cincelado y con altos valores de Dap tuvieron como limitante el $\Theta_{10\%aire}$, representando el 9% y el 25% del límite superior para los tratamientos con triticale y girasol respectivamente. Considerando la textura del suelo, era esperable que este

límite apareciera con mayor frecuencia según la bibliografía, que plantea que la limitación del IHO por $\Theta_{10\%aire}$ es común en suelos arcillosos, debido a la baja macroporosidad (Calonego y Rosolem, 2011).

En el tercer año del experimento, el IHO aumentó en la capa de 0 a 20 cm en todos los tratamientos. Aún así, el límite inferior continuo siendo $\Theta_{RP=2MPa}$, con excepción de los tratamientos de triticale con cincelado, a bajas densidades aparentes, donde el IHO fue igual al AD, lo cual es típico de un perfil de suelo que es menos restrictivo para el desarrollo de las raíces (Calonego y Rosolem, 2011). A pesar de estos resultados, es esperable que bajo SD y luego de utilizar cultivos de cobertura vigorosos, con sistemas radiculares agresivos, el valor crítico de resistencia a la penetración aumente, ya que los bioporos dejados por las raíces al descomponerse permiten el crecimiento de nuevas raíces en el perfil, sin que deban atravesar la matriz del suelo (Silva y Rosolem, citados por Calonego y Rosolem, 2011).

Las rotaciones de girasol y cáñamo durante tres años consecutivos resultaron en los mayores contenidos de materia orgánica en la capa de 0 a 20 cm, con una reducción de la resistencia a la penetración (Calonego y Rosolem, 2011). Los autores deducen que el laboreo biológico que realizan los cultivos de cobertura, en contraste con el cincelado, evolucionaría más rápidamente a condiciones físicas favorables, especialmente cuando el contenido de materia orgánica es incrementado.

Como conclusiones, los autores destacan que el cincelado disminuyó la Dap en el estrato de 0 a 20 cm, incrementando el IHO al disminuir $\Theta_{RP=2MPa}$, este efecto es medible hasta el tercer año luego del cincelado inclusive. Las rotaciones con cultivos de cobertura durante tres años, previnieron incrementos en la Dap hasta valores superiores a la Dap crítica, para el estrato de 0 a 20 cm. Este efecto es observado hasta una profundidad de 40 cm en los tratamientos con cincelado y en rotaciones con sorgo forrajero como cultivo de cobertura. Por lo tanto, el cincelado y algunas rotaciones en SD son efectivos como medidas de manejo para incrementar la calidad física de suelos pesados, reportado por el IHO.

Resumiendo esta sección, las prácticas de manejo tienen efecto sobre el IHO. Encontrando que todos los autores reportan un menor valor del IHO como resultado de las prácticas que tienden a aumentar la Dap. En cuanto a los

sistemas de laboreo, en general se plantea que la siembra directa disminuye los valores de IHO, ya sea por aumentos en RP o disminuciones de la aireación. Sin embargo, algunas rotaciones bajo SD podrían disminuir Dap, y por tanto aumentar los valores del IHO. Mayores compactaciones, ya sea por mayor tráfico de maquinaria o mayor carga animal, disminuyen el IHO por aumentos en RP. En general, las rotaciones de cultivos tienen efecto sobre el IHO si modifican el contenido de CO del suelo, lo cual no fue observado en todos los casos. Este mismo efecto es observado en el caso de la fertilización de cultivos y agregado de enmiendas orgánicas.

2.3.1.5. Intervalo hídrico óptimo y crecimiento vegetal

En este capítulo se presentan aquellos estudios que relacionan el IHO con el crecimiento vegetal, un resumen de dichos trabajos se muestra en el siguiente cuadro.

CUADRO 3: Resumen de trabajos que vinculan el IHO con el crecimiento vegetal.

Autor	Variables	Cultivo y parámetro de crecimiento	Suelo	Resultados
Da Silva y Kay (1996)	IHO, Pout	Maíz, tasa de elongación de hojas	Tres tipos	Relación negativa entre Pout y el crecimiento vegetal y mas fuerte que la relación con el IHO
Benjamin et al. (2003)	IHO, WSD	Maíz, trigo, rendimiento en grano	Franco	IHO es buen indicador de productividad de los cultivos, siempre y cuando no existan limitantes hídricas. De existir limitantes WSD muestra mayor relación con rendimiento

Klain y Camara (2007)	IHO	Soja, rendimiento en grano	Arcilloso	Menores valores de IHO -por un $\Theta_{RP=2MPa}$ mayor- no se relacionaron con menores rendimientos de soja
Verma y Sharma (2008)	IHO	Trigo, rendimiento en grano	Franco arcillo limoso	El IHO se relacionó significativamente con el rendimiento de trigo, independientemente del sistema de fertilización evaluado
Wilson et al. (2008)	IHO	Trigo, número de plantas	Brunosol franco arcillo-limoso y vertisol franco arcillo- limoso	Hay una disminución del crecimiento de trigo conforme el IHO disminuía por aumentos de la compactación
Imhoff et al. (2010)	RP, Potencial hídrico	Maíz, tasa de transpiración por planta	De franco arenoso a franco arcillo-limoso	Las variables de crecimiento muestran una respuesta en forma de curva "s" en relación a RP y potencial mátrico del suelo

Donde: WSD= Water Stress Day, RP = Resistencia a la penetración

Considerando que gran parte de la variabilidad temporal del contenido del agua en el suelo depende del clima, Da Silva y Kay (1996) plantean que un mayor valor de IHO es preferible ya que la probabilidad de que éste caiga fuera del rango del IHO es menor, en cambio en un suelo con un menor IHO las probabilidades son mayores, por lo que los cultivos serán sometidos a estrés de manera más frecuente tanto por exceso como por déficit hídrico (Kay, citado por Da Silva y Kay, 1996).

En relación a esto, el comportamiento de IHO sobre el crecimiento vegetal ha sido reportado por Da Silva y Kay (1996). Estos autores encuentran que el número de medidas de humedad del suelo que caen fuera del IHO durante el período de cultivo, tiene una relación más fuerte con el crecimiento vegetal que el IHO en sí. El estudio fue realizado en 1992 y 1993, en Clinton,

Ontario, Canadá, sobre tres tipos de suelo. Las medidas fueron realizadas de 0-20 cm ya que es donde se da el mayor crecimiento radicular y la mayor variabilidad en el contenido hídrico del suelo. El contenido de humedad fue determinado periódicamente y contrastado con el IHO, para determinar la frecuencia acumulada de contenido hídrico fuera del rango del IHO (Pout).

Estos autores muestran correlaciones lineales y negativas entre Pout y las tasas de elongación de las hojas de maíz. También reportan diferencias en Pout para los diferentes tipos de suelos, siendo mayor para aquellos suelos de IHO más estrecho. Encontraron además una variabilidad en la naturaleza del Pout en función del año. En el año 1992, el 100% de las observaciones de Pout se debieron a contenidos hídricos por encima del límite superior del IHO, mientras que en el año 1993, todos los casos en los que el contenido hídrico estuvo fuera de IHO se debieron a humedades menores al límite inferior. A pesar de la naturaleza variable del Pout, el crecimiento vegetal fue afectado de la misma manera cuando el contenido de agua limitó tanto como consecuencia de exceso o déficit hídrico, demostrando la insensibilidad del crecimiento vegetal a la naturaleza del estrés.

Así, el autor afirma que el valor de IHO como parámetro que permita relacionar la calidad estructural del suelo con el crecimiento vegetal, está dado por la estrecha relación que dicho parámetro tiene con el Pout. Los valores del Pout dependen además de las lluvias, de las características del drenaje del suelo, infiltración y evaporación.

Benjamin et al. (2003) relacionaron los rendimientos de maíz y trigo con la magnitud del IHO. En el experimento fueron evaluados dos sistemas de laboreo, SD y laboreo convencional, y distintas rotaciones. Se analizaron los rendimientos de maíz y trigo en relación al IHO de cada parcela. Para los rendimientos de trigo las rotaciones evaluadas fueron trigo- barbecho en SD, trigo- barbecho en LC y trigo luego del cultivo de millet.

Las relaciones encontradas fueron altas y significativas para los rendimientos de trigo luego de barbecho en SD ($r^2 = 0,76$), pero bajas y no significativas para el trigo-barbecho con laboreo y para el trigo después de millet ($r^2 = 0,34$). Según los autores esto se debe a la baja disponibilidad hídrica causada por el secado de la superficie del suelo en el tratamiento con laboreo, y por el consumo de agua del cultivo anterior en caso de millet- trigo; por lo que concluyen que el IHO podría ser un buen indicador de productividad de los

cultivos siempre y cuando no existieran limitantes hídricas durante el ciclo. La capacidad de este indicador de predecir rendimientos se vería limitada en casos donde exista una baja cantidad de agua disponible durante el cultivo, ya que la productividad no será reflejo de la condición del suelo. En el caso del rendimiento de maíz la relación encontrada fue aún más baja ($r^2=0,18$), sin importar los tratamientos, dado la gran sensibilidad del cultivo al estrés hídrico.

Los autores proponen un nuevo parámetro relacionado con el IHO, los días con estrés hídrico o Water Stress Day (WSD), como medida del déficit hídrico acumulado que el cultivo experimenta durante el ciclo. Éste se calcula como la suma de las diferencias entre el contenido hídrico del suelo y el límite inferior del IHO.

Los mismos autores, para otro experimento en el que evaluaron rendimientos de maíz en relación al IHO y a WSD, encontraron relaciones significativas entre este nuevo parámetro y el rendimiento de maíz en seco, con un $r^2=0,60$; siendo superior al encontrado cuando los rendimientos fueron relacionados con el valor de IHO, con un $r^2=0,002$. En base a esto los autores concluyen que el conocimiento de las dinámicas hídricas intraestacionales, en conjunto con propiedades relativamente estáticas, como el IHO o la Dap, pueden mejorar la habilidad para predecir y explicar los rendimientos en relación a las prácticas de manejo.

Klain y Camara (2007), determinan el IHO en un sistema de SD y uno con cincel, y lo relacionan con el rendimiento en grano de soja. Se evaluó el IHO, la variación de la humedad del suelo durante el ciclo de la soja y el rendimiento de grano.

Para el sistema SD, el contenido hídrico estuvo por debajo del IHO para todas las profundidades evaluadas, durante todo el ciclo del cultivo, siendo $\Theta_{RP=2MPa}$ el límite inferior del IHO. En el tratamiento con cincelado el mayor valor de $\Theta_{RP=2MPa}$ y por tanto de IHO, provocó que la humedad del suelo se encuentre dentro de la humedad óptima durante la mayor parte del ciclo. A pesar de esto, el rendimiento de soja no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, lo que permite concluir que $\Theta_{RP=2MPa}$ no representaría una limitante para el crecimiento del cultivo de soja en los tratamientos de SD.

Verma y Sharma (2008), en un suelo de textura media -franco limoso a franco arcillo limoso- en Palampur (India), encuentran que el IHO se relacionó

positiva y significativamente con el rendimiento del cultivo de trigo, en una rotación de maíz-trigo, independientemente del sistema de fertilización evaluado. Ellos afirman que las prácticas de manejo que resulten en aumentos de IHO pueden aumentar el potencial de los suelos para la producción de cultivos.

Wilson et al. (2008), estudiaron el efecto la magnitud del IHO y su relación con el crecimiento de trigo, para suelos molisoles y vertisoles, con distintos grados de compactación. Los autores encontraron una disminución del crecimiento de trigo conforme el IHO disminuía por aumentos de la compactación, a partir de la Dap en la que comenzó a limitar 10% de poros con aire. Ya que el suelo fue mantenido a capacidad de campo durante el ensayo, la reducción en el nacimiento de plantas se atribuye al estrés provocado por la falta de aireación. También fue observado que para valores mayores a Dap crítica (IHO= 0) no hubo nacimiento de plantas. Para el suelo vertisol, en cambio, los ciclos de expansión- contracción redujeron la Dap del suelo, manteniéndola en un valor menor a la Dap crítica, y no se observaron reducciones en el crecimiento vegetal.

Imhoff et al. (2010), en base al análisis de parámetros de crecimiento vegetal en función de los componentes del IHO, encontraron que tanto para RP como para potencial mátrico del suelo (evaluado en el rango de déficit hídrico), las variables de crecimiento muestran una respuesta en forma de curva "s". Según esta relación, a bajos valores de RP y/o potencial hídrico no se observan disminuciones de crecimiento vegetal, para luego presentar una respuesta fuertemente negativa. El crecimiento vegetal disminuye hasta alcanzar un valor mínimo en un valor de RP o potencial críticos, a partir del cual incrementos en RP o potencial no producen cambios significativos en el crecimiento vegetal.

Los autores también reportan diferentes sensibilidades a los parámetros del IHO para las distintas variables de crecimiento vegetal. Siendo las variables de crecimiento aéreo más sensibles tanto a RP como a potencial hídrico. Para las variables que cuantifican el crecimiento radicular, no existió respuesta al potencial hídrico, sino solamente a RP. Imhoff et al. (2010) citan a Masle et al., quienes explican que las plantas tienen mecanismos de monitoreo de las condiciones adversas del suelo, y generan respuestas que priorizan el crecimiento de raíces para superar dichas condiciones. Esto implica que las mayores disminuciones en crecimiento se observarían en la parte aérea de las

plantas, lo que es consistente con los resultados del experimento. Los menores valores críticos de RP de las variables aéreas, de entre 1,1 y 2,8 MPa, en relación a las variables de crecimiento radicular, cuyo rango fue de 3,0 a 3,5 MPa, avalan este hecho.

A modo de resumen, la mayor parte de los estudios revisados encuentran relación entre el crecimiento vegetal y el IHO, o algún parámetro relacionado con este indicador (Pout, WSD, RP, potencial mátrico).

2.4. EVOLUCION DE LAS PROPIEDADES FISICAS EN EL EXPERIMENTO DE ROTACIONES AGRICOLA-GANADERAS DE LA ESTANZUELA

El experimento de rotaciones de La Estanzuela, instalado en el año 1963, tiene como uno de sus principales objetivos el estudio de la evolución de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintas rotaciones y sistemas de fertilización. En esta sección se hará un breve resumen de la evolución de esas propiedades para los diferentes sistemas, el cuadro 4 muestra los diferentes tratamientos del experimento.

CUADRO 4: Resumen de los diferentes tratamientos del experimento de largo plazo de INIA La Estanzuela.

No. de sistema	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Intensidad de uso agrícola
1	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	1,33
2	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	1,33
6	Cebada Sorgo	Girasol 1 ^a	Trigo	Cebada Sorgo 2 ^a	Girasol 1 ^a	1,33

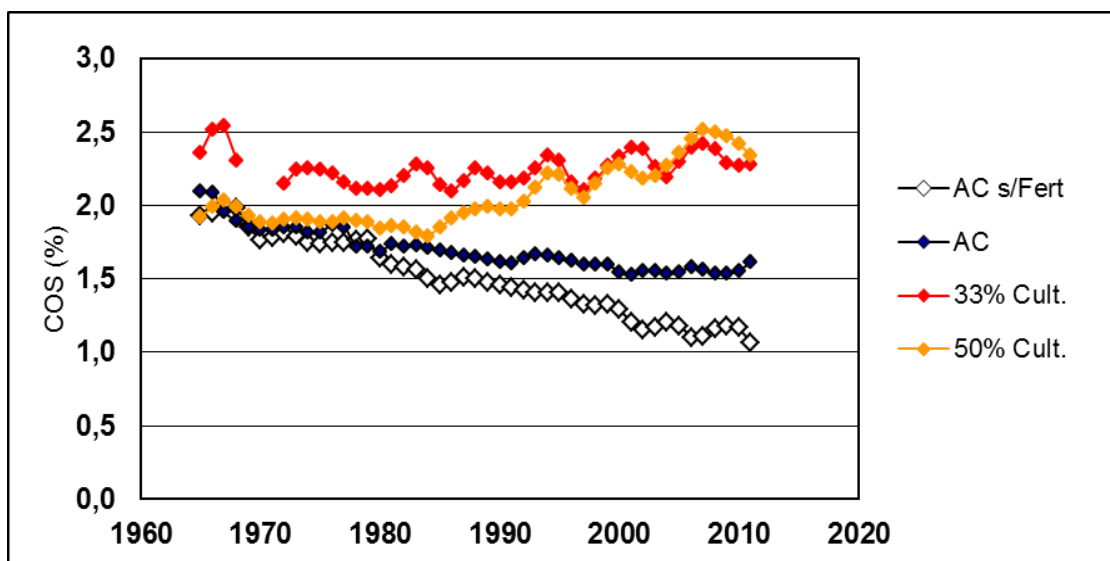
	2 ^a					
7	<u>Trébol Rojo</u>	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo c/ <u>T. Rojo</u>	<u>Trébol Rojo</u>	Cebada Girasol 2 ^a	1
3	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo c/ <u>Lotus</u>	<u>Lotus</u>	<u>Lotus</u>	0,67
5	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo c/ <u>Prad</u>	<u>Pradera mixta</u>	<u>Pradera mixta</u>	0,67
4	Cebada c/ <u>T. Rojo</u>	<u>Trébol Rojo</u>	Trigo c/ <u>Prad</u>	<u>Pradera mixta</u>	<u>Pradera mixta</u>	0,33

Intensidad de uso se calcula como: duración de la fase de cultivos/ duración de la rotación. Fuente: Quincke²

2.4.1. Evolución del carbono orgánico del suelo

La evolución del carbono orgánico en los diferentes sistemas, a una profundidad de 0 a 15 cm, se muestra en la siguiente grafica.

FIGURA 6: Evolución del CO en el experimento de rotaciones de La Estanzuela, para cuatro sistemas de rotaciones



² Quincke, A. 2009. Mixed crop rotations in Uruguay (sin publicar)

Fuente: Quincke³

Resultados publicados por Morón y Díaz (2003) señalan diferencias de 1% de CO entre los sistemas más contrastantes. Este uno por ciento puede representar, para una hectárea en un suelo de 20 cm de profundidad, entre 20000 y 25000 kg de CO. Los resultados análisis de CO muestran un aumento en estas diferencias, el cual se puede observar en la figura 6. La magnitud de estas diferencias entre el sistema de ACs/Fert y el sistema de 33%Cult alcanza el 1,27% para el año 2010.

El balance negativo en los sistemas de agricultura continua es explicado por Sawchic (2001) como consecuencia de la alta intensidad de laboreo, la erosión y el bajo retorno de residuos, asociado a una baja productividad de los cultivos.

En los sistemas de rotación con pasturas los valores de CO se mantienen cerca de los valores iniciales, a pasar de esto se observan ciclos de ganancia y pérdida de CO, que coinciden con las etapas de pasturas y cultivos respectivamente.

Resultados experimentales muestran que los sistemas de agricultura continua mineralizan menos CO que aquellos que incluyen pasturas, tanto en invierno como en primavera, teniendo la temperatura un alto impacto (Morón y Baethgen, citados por Morón y Díaz, 2003). Las rotaciones con pasturas mineralizan más CO debido no solo a su mayor contenido de C, sino también a que presentan mayores fracciones de ese CO en formas más lábiles (susceptibles a ser mineralizadas). Esto explica el rápido aumento de CO en la fase de pasturas y la rápida disminución al inicio de la fase de cultivos (ya que las fracciones lábiles de CO se oxidan más rápidamente) (Sawchic, 2001).

2.4.2. Evolución de las propiedades físicas del suelo y erosión

Un estudio sobre la evolución de las propiedades físicas del suelo en el experimento, para los sistemas mixtos, fue realizado por García Prechac (2001). El autor encuentra que durante la etapa de cultivos la estructura del

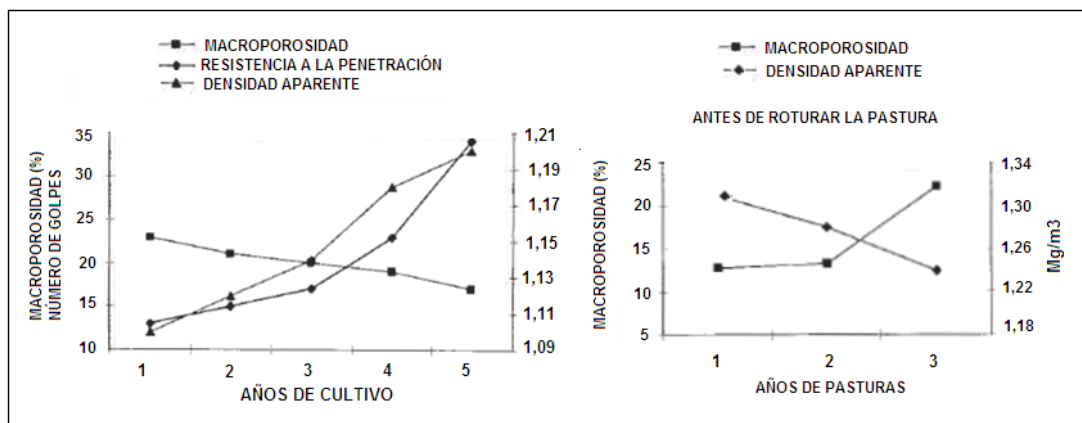
³ Quincke, A. 2011. Carbono orgánico en el experimento de rotaciones de INIA La Estanzuela (sin publicar)

suelo se deteriora, medido como Dap, macroporosidad y resistencia a la penetración.

Los resultados de este estudio se muestran en la figura 7, donde se observa que a medida que aumentan los años de cultivos luego de una pastura, se produce un aumento de la Dap y RP, y una disminución en el contenido de macroporos. El autor atribuye esto a: 1) Un balance negativo de MO; 2) Una disminución de la cobertura del suelo, lo que produce erosión y encostramiento; 3) Al tráfico de maquinaria, que produce compactación y traumatismos en los agregados del suelo.

Estos efectos son revertidos durante la etapa de pasturas, dándose un aumento en los macroporos y una disminución en la RP. La desaparición de los efectos anteriores conduce a la recuperación de la agregación, mejorando la estructura y las propiedades por ella determinadas (García Préchac, 2001).

FIGURA 7: Evolución de las propiedades físicas de suelo, en función de años pastura (a) y cultivo (b)



Fuente: García Préchac (2001)

Determinaciones de Dap, realizadas en los tratamientos del ensayo en 1969 y 1979, mostraban que en promedio, los mayores valores los presentaban los sistemas de cultivos continuos y los menores las rotaciones de cultivos y pasturas de larga duración, siendo intermedios los valores de las rotaciones de cultivos y pasturas de corta duración (Díaz et al., citados por García Préchac,

2001). Estos valores estaban claramente correlacionados con los contenidos promedio de materia orgánica del suelo.

El autor afirma que el deterioro de las propiedades físicas del suelo se produce en forma paulatina a medida que se aumenta el número de cultivos con arado en la rotación, independientemente del tipo de cultivo. A su vez la recuperación de la estructura es continua con la duración de las pasturas en la rotación (García Préchac, citado por García Préchac, 2001).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El ensayo se realizó en el experimento de Rotaciones Agrícola-Ganaderas instalado en el año 1963, en 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, con textura franco-arcillo-limosa y con una pendiente suave a moderada de aproximadamente 2 a 4%. El experimento consiste de siete tratamientos o sistemas de distinta intensidad de uso del suelo (mostrados en el cuadro 4), en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para el presente estudio se utilizaron cuatro de estos sistemas que se describen en el cuadro 5.

CUADRO 5: Descripción general de los tratamientos del experimento de Rotaciones de INIA La Estanzuela usados en el presente estudio.

Abreviación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Característica distintiva
ACs/Fert	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Agricultura continua sin fertilizantes.
AC	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo	Agricultura continua
50%Cult	Sorgo 1 ^a	Cebada Girasol 2 ^a	Trigo c/PP	PP <u>mixta</u>	PP <u>mixta</u>	PP <u>mixta</u>	Rotación con una PP mixta (de F+TB+L).
33%Cult	Cebada c/T. Rojo	<u>Trébol</u> <u>Rojo</u>	Trigo c/PP	PP <u>mixta</u>	PP <u>mixta</u>	PP <u>mixta</u>	Rotación con 2 tipos de PP: T.Rojo y P mixta.

Donde las rotaciones mostradas fueron usadas desde el año 1983 al 2009. ACs/Fert = Agricultura continua sin fertilización. AC= Agricultura continua. 50%Cult= 50% del tiempo bajo cultivos y pasturas respectivamente. 33%Cult.= 33% del tiempo bajo cultivos y 66% bajo pasturas. F= Festuca. TB= Trébol blanco. L= Lotus. PP= Praderas permanentes. Fuente: Elaboración propia

El experimento fue objeto de ciertos ajustes de diseño, en virtud de los cambios ocurridos en la producción agrícola comercial del país. Estos cambios

fueron implementados básicamente en los años 1974, 1983 y 2009, aunque los sistemas de uso del suelo, concebidos originalmente por el Ing. Agr. Castro, prácticamente no variaron en su esencia. En los siguientes párrafos se realiza un breve resumen de dichos cambios.

Inicialmente la secuencia básica de cultivos fue lino-trigo-girasol de primera trigo-girasol de primera. Esta secuencia se repetiría continuamente en los sistemas de agricultura continua y en el sistema 50%Cult se alternaba con una pastura de Trébol Blanco y Festuca de 4 años. El sistema 33%Cult incluía pasturas anuales como el raigrás y “praderas intercalares” de trébol rojo, cuya duración no excedía 12 meses. Los bloques se manejaron inicialmente en forma “sincronizada”. Por ejemplo, en 1963, las 3 repeticiones del sistema ACs/Fert tuvieron lino, en 1964 trigo, etcétera.

En 1974 se establece una nueva secuencia para incorporar el cultivo de sorgo granífero: sorgo de primera-lino-trigo-girasol de primera-trigo. Además, en 1974 se procedió al desfase de los bloques, a efectos de poder mejorar el análisis estadístico de los datos al permitir separar el “efecto año” del efecto “año de la secuencia”.

En 1983 el lino es sustituido por la cebada y además se comienza con cultivos “de segunda”, pasándose de una secuencia de cinco años a una de tres años de duración: sorgo de primera-cebada/girasol de segunda-trigo. En el sistema 50%Cult la pradera es una mezcla de Trébol Blanco, Lotus corniculatus y festuca, y que se sembraría en forma consociada con trigo. Por lo tanto la rotación del sistema 50%Cult pasó a tener una duración de 6 años (en lugar de nueve). En el sistema 33%Cult, el trébol rojo pasaría a ser una “pradera corta” de 2 años, sembrada consociada con cebada. Además se introduce una fase de pradera permanente, tal como en el Sistema 50%Cult. De esta manera el sistema 33%Cult, que originalmente fue un sistema que rotaba con pasturas anuales, pasó a ser el sistema con la mayor proporción de pasturas: 4 años de pastura y 2 de cultivos. Las rotaciones representadas en el cuadro 5 se corresponden al período desde 1983 hasta 2008.

Históricamente, el ensayo fue manejado con laboreo convencional, utilizándose inicialmente laboreo primario y secundario. Gradualmente se ha ido reemplazando el arado de rejas por otras herramientas como la excéntrica, el cincel o el vibrocultivador. Además, en la década de los 90 se fue generalizando

el uso de glifosato, en sustitución de una o más operaciones de laboreo. Por lo tanto ha habido una gradual, pero relevante reducción en la intensidad de laboreo, llegándose al extremo de instalar cultivos sin laboreo. Desde el 2009 se propuso que en forma generalizada se adopte el sistema de siembra directa.

A partir del mismo año se definió además una fase agrícola más intensa (y menor tiempo de barbecho). Para los sistemas de agricultura continua y 50%Cult la nueva secuencia incluye, además el cultivo de maíz: Avena/Sorgo de primera–Trigo/Girasol de segunda–Maíz de primera, donde la avena es un cultivo de cobertura. En el sistema 33%Cult se redujeron de 4 a 3 los años de pastura, con una secuencia agrícola de 3 años que incluye el cultivo de soja: Avena/Soja de primera– Trigo/Girasol de segunda–Soja de primera.

3.2. OBTENCION DE MUESTRAS Y PROCESAMIENTO

Las campañas de muestreo fueron los días 15-Mar, 25-Abr y 24-May del año 2011 para los bloques I, II y III respectivamente.

El procedimiento de toma de muestras es el mismo en todas las ocasiones. En primer lugar se señala el centro de las parcelas con una estaca, tomando todas las muestras en un radio de 5 m alrededor de la misma. Se procede a retirar los primeros 5 cm de suelo, y luego utilizando anillos de acero ($h=5\text{ cm}$, $V=100\text{ cm}^3$), se toman las muestras desde una profundidad de 5 cm a 10 cm. Se tiene la precaución de lograr un anillo totalmente lleno de suelo y de no perturbar y/o compactar la muestra durante la limpieza de las mismas.

De cada parcela se toman 15 muestras imperturbadas. Doce de éstas son analizadas en una secuencia de etapas para determinar macroporosidad, $\theta_{10\%aire}$ y $\theta_{RP=2MPa}$. En las restantes tres se determinaran θ_{CC} y θ_{PMP} . Se determinan además en las 15 muestras Dap y porosidad total. Por parcela se realiza una determinación de CO del suelo para el estrato de 5 a 10 cm.

3.3. DETERMINACIONES PARA LA CONSTRUCCION DEL IHO

3.3.1. Contenido hídrico a 10% de poros con aire ($\theta_{10\%aire}$)

Para el cálculo de este límite se utiliza la siguiente formula (Hillel, 1980):

$$f_a = f - \theta_{v/v}$$

Siendo f_a la porosidad del suelo a una humedad dada (en nuestro caso 10%), f la porosidad total y $\theta_{v/v}$ el contenido de agua volumétrico.

La porosidad total es calculada mediante la fórmula:

$$f = 1 - (D_{ap} / 2,65)$$

Donde D_{ap} es densidad aparente, calculada como peso seco sobre el volumen de la muestra. El peso seco se calcula pesando el cilindro luego de secado al aire (descontando la tara del cilindro y los auxiliares), y multiplicándolo por el porcentaje de humedad. Este es obtenido por la relación de pesos de una submuestra de 50 g (húmeda), y su peso secada a 105 ° C en estufa por 24 horas.

3.3.2. Contenido hídrico a resistencia a la penetración igual a 2 MPa **($\theta_{RP=2MPa}$)**

Las muestras imperturbadas son saturadas durante 48 hs en mesa de saturación y luego llevadas a mesa de tensión de 60 cm. Las determinaciones de cada parcela se realizan en cuatro series de secado, buscando llegar a diferentes humedades, determinándose así la RP en tres muestras por parcela por serie.

Las determinaciones se realizan con un penetrómetro de cono (Rimik CP10), con un punta fina de área de cono de 0.6 cm². Para los cálculos fue utilizada la formula de corrección por punta fina (Quincke y Pérez-Gomar, 2010):

$$RP = 2,186 \times RP_{Lectura} - 64,723 \text{ kpa}$$

Cada determinación del penetrometro registra tres valores de cada muestra, correspondientes a las profundidades de suelo de 6,5 cm, 8,0 cm y 9,5 cm que son promediados para obtener un único valor.

3.3.2.1. Ajuste de las curvas de RP en función de la humedad

Una vez corregidos los valores, se ajusta una curva empírica de resistencia a la penetración Vs humedad del suelo para cada sistema. Se

selecciona la curva con mayor r^2 mediante la cual se estima $\theta_{RP=2MPa}$ correspondiente.

Para el tratamiento de CC s/Fert la curva ajustada fue:

$$y = -7086 \ln(x) - 6234 \quad r^2 = 0,755 \quad N = 28$$

Para el tratamiento de CC c/Fert la curva ajustada fue:

$$y = 21121 e^{-7,87 x} \quad r^2 = 0,738 \quad N = 22$$

Para el tratamiento de 50% Cult la curva ajustada fue:

$$y = 62854 x^2 - 57979x + 13585 \quad r^2 = 0,88 \quad N = 35$$

Para el tratamiento de 33% Cult la curva ajustada fue:

$$y = 18988 e^{-8,12 x} \quad r^2 = 0,805 \quad N = 35$$

Cabe aclarar que para todas las parcelas se parte de un total de 36 datos de RP vs humedad, se descartan aquellos considerados fuera de tipo. En el caso particular del sistema CC c/Fert. se descartó la parcela correspondiente al bloque 3 por mostrar inconsistencias.

3.3.3. Contenido hídrico a capacidad de campo y punto de marchitez permanente (θ_{CC} y θ_{PMP})

Para la determinación de estos parámetros se utilizan tres muestras imperturbadas por sistema por bloque (un total de 36 muestras). Las muestras son saturadas y luego ingresadas a una serie de ollas de presión, donde son equilibradas a presiones de 0,1 y 1,5 MPa para la determinación del contenido hídrico a potenciales de -0,1 y -1,5 MPa, correspondientes a θ_{CC} y θ_{PMP} . El agua disponible se calcula como la diferencia entre θ_{CC} y θ_{PMP} .

3.4. DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS

La macroporosidad fue medida en las muestras indisturbadas que ingresan a la mesa de tensión y se corresponde a la humedad a tensión de 60 cm (0,006 MPa) (Bezerra de Oliveira, 1968).

Con las muestras de los anillos, una vez determinada RP en el laboratorio, se forma una muestra compuesta para cada parcela en la que se determina el contenido de carbono orgánico. La determinación de carbono orgánico del suelo se realizó con el método de combustión seca a 900°C y detección con infrarrojo, utilizando un equipo LECO Truspec (Wright y Bailey, 2001).

3.5. ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico fue básicamente ANOVA y separación de medias para un diseño de bloques completos con tres repeticiones. El mismo es realizado con el PROC Mixed del programa Statistical Analysis Treatment (ver versión 6.11; SAS Institute). En caso de existir diferencias significativas las medias se separaron utilizando una diferencia mínima significativa (DMS) de Tukey, con un intervalo de confianza del 95%.

Las variables independientes analizadas fueron: IHO, densidad aparente, macroporosidad, θ_{CC} y θ_{PMP} , $\theta_{10\%aire}$, agua disponible y carbono orgánico del suelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARBONO ORGANICO, DENSIDAD APARENTE y MACROPOROSIDAD

A continuación se presentan los datos obtenidos para carbono orgánico del suelo, densidad aparente y macroporosidad, en los tratamientos evaluados.

CUADRO 6: Carbono orgánico (CO), densidad aparente (Dap) y macroporos según intensidad agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela.

	CO (mg C/g)	Dap (g/cm ³)	Macroporos (%)
ACs/Fert	12,1 B	1,50 A	5,6 C
AC	15,2 B	1,44 B	7,1 B
50%Cult	21,7 A	1,31 C	7,8 AB
33%Cult	24,0 A	1,33 C	8,7 A
Pr > F	0,0004	< 0,0001	<0,0001
N	12	180	143

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

El tratamiento con menor contenido de CO se corresponde con ACs/Fert (12,1 mg C /g), seguido por el tratamiento AC (15,2 mg C /g), sin embargo estos dos sistemas de agricultura continua no se diferenciaron estadísticamente entre sí. El sistema con mayor contenido de CO fue el de 33%Cult con un valor de 24 mg C/g. Ambos sistemas mixtos no se diferenciaron estadísticamente entre sí, pero sí se diferenciaron estadísticamente de los tratamientos de agricultura continua.

El orden de los tratamientos en función de su contenido de CO coincide con lo reportado por Morón et al. (2009) para este mismo ensayo. A pesar de esto, los valores no son netamente comparables ya que existen diferencias en la profundidad de muestreo, que en este caso se corresponde al estrato 5- 10 cm, mientras que en el trabajo de Morón et al. (2009) el estrato estudiado fue de 0- 15 cm.

Los menores valores del sistema de ACs/Fert se deben al balance negativo de CO que este sistema tiene, el cual fue reportado por Morón et al. (2009), quienes lo atribuyen al proceso de erosión y al bajo ingreso de residuos orgánicos vegetales. La reciente incorporación de la siembra directa en este experimento a partir del 2009, probablemente provoque que el balance de CO se torne menos negativo al reducir la erosión. Por lo que se esperaría una reducción en la tasa de disminución del CO del suelo. Sin embargo la diferencia de muestro ya mencionada y el breve periodo de tiempo desde que se inicio la SD impedirían comprobar si efectivamente esta ocurriendo un cambio en la tendencia. Por otro lado, los sistemas que incluyen pasturas tienen mayores ingresos de residuos por mayor producción de raíces e incorporación de la biomasa aérea luego del corte y menor erosión. Además, resultados sobre el mismo experimento muestran una mayor tasa de mineralización del CO en estos sistemas (Morón y Díaz, citados por Morón, 2003).

En cuanto a la densidad aparente, el mayor valor se encontró en el tratamiento de ACs/Fert, seguido por el sistema AC. Los tratamientos de rotación con pasturas no fueron estadísticamente diferentes entre sí, pero sí presentaron menores valores estadísticos que los de agricultura continua. El orden de los sistemas puede estar explicado por las diferencias en producción e incorporación de biomasa al suelo. Esto se traduce en mayores niveles de MO en el suelo, lo que favorece el proceso de agregación y resulta en menores valores de la Dap (Morón y Quincke, 2010).

En cuanto al parámetro macroporosidad del suelo, se repite la tendencia encontrada para los demás indicadores, con menores valores para el tratamiento de ACs/Fert (5,6%), seguido por AC (7,1%), que no difiere de 50%Cult (7,8%). El sistema con mayor macroporosidad fue el de 33%Cult (8,7%), si bien tampoco presentó diferencias respecto al sistema 50%Cult.

De esta manera, la diferente intensidad de uso es reflejada por indicadores clásicos de calidad física de suelo como CO, macroporosidad y

Dap, siendo el último el indicador que logra discriminar mejor los tratamientos. Esto se contrapone con lo presentado por Morón y Quincke (2010), quienes encontraron que para suelos agrícolas de Soriano (Uruguay) el indicador más sensible a la intensidad de uso agrícola fue macroporosidad. A pesar de esto, ninguno de los indicadores presentados en esta sección logra diferenciar los sistemas mixtos entre sí. Esto podría implicar, que para los indicadores clásicos -en el caso de este experimento- el efecto de la inclusión de pasturas es de mayor magnitud que la duración de las mismas.

4.2. AGUA DISPONIBLE

A continuación se presentan los datos obtenidos para el contenido de agua del suelo y sus límites, en los diferentes tratamientos del experimento de rotaciones.

CUADRO 7: Contenidos de humedad a capacidad de campo (θ_{CC}), contenido de humedad a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) y valor de agua disponible (AD) según la intensidad de uso agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela.

	θ_{CC} (cm ³ /cm ³)	θ_{PMP} (cm ³ /cm ³)	AD (cm ³ /cm ³)
ACs/Fert	0,38	0,29	0,09 B
AC	0,40	0,26	0,14 A
50%Cult	0,41	0,28	0,13 AB
33%Cult	0,40	0,31	0,10 B
Pr > F	NS	NS	0,03
N	36	36	36

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

No se encontraron efectos significativos de los tratamientos en θ_{CC} y θ_{PMP} , no obstante sí los hubo sobre el agua disponible. Así, el tratamiento de

ACs/Fert presenta el menor valor de AD ($0,09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), no siendo estadísticamente diferente de los sistemas mixtos ($0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para 33%Cult y $0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para 50%Cult). El sistema con mayor valor de AD es el de AC ($0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), aunque no diferenciándose del sistema 50%Cult

Como fue mencionado en la revisión de este trabajo, la estructura de un suelo es determinante de la capilaridad del mismo, y por lo tanto de su capacidad de retener agua a altos contenidos de humedad (Urach, citado por Silva Barboza, 2011). Considerando que los diferentes tratamientos presentaron diferencias en macroporos y Dap, eran esperables diferencias en θ_{CC} . En el caso de θ_{PMP} , estos mismos autores afirman que el efecto de la estructura del suelo es casi nulo, por lo que el no encontrar diferencias en este parámetro es coherente con lo esperado.

El contenido de agua disponible ha sido propuesto como un indicador de calidad física de suelo, sin embargo en este trabajo no sigue una tendencia relacionada con la intensidad de uso agrícola, ni con la mostrada por otros indicadores clásicos de calidad física presentados.

El motivo de esto puede ser que para la determinación de θ_{CC} y θ_{PMP} se utilizaron 3 anillos por parcela, lo cual puede ser insuficiente. En este sentido un estudio realizado por Moraes y Libardi (1993), encuentran que el número de muestras analizadas para estimar estos parámetros con un buen intervalo de confianza debería ser incluso mayor a siete muestras por parámetro, dada la alta variabilidad de estas propiedades.

4.3. INTERVALO HIDRICO ÓPTIMO

4.3.1. Comportamiento de los límites $\theta_{10\%aire}$ y $\theta_{RP=2MPa}$

El siguiente cuadro muestra los valores obtenidos para los dos límites que se suman al AD para el cálculo del IHO.

CUADRO 8: Contenido de humedad a 10% de poros con aire en el suelo ($\theta_{10\%aire}$) y contenido de humedad a una resistencia a la penetración igual a 2 MPa ($\theta_{RP=2MPa}$) según la intensidad de uso agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela.

	$\theta_{10\%aire}$	$\theta_{RP=2MPa}$
ACs/Fert	0,34 C	0,31
AC	0,36 B	0,30
50%Cult	0,40 A	0,29
33%Cult	0,41 A	0,27
Pr > F	<0,0001	--
N	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.

El menor valor de $\theta_{10\%aire}$ se encuentra en el sistema ACs/Fert, seguido por el sistema de AC. Los sistemas que incluyen pasturas tienen los mayores valores de $\theta_{10\%aire}$, y no son estadísticamente diferentes. Estos resultados son coherentes con lo esperado, ya que el límite es función directa de la Dap (ver sección 2.3.1.1.) y por tanto muestra las mismas diferencias que dicho indicador. Los resultados muestran que, en aquellos sistemas con mayor degradación las limitantes por aireación se dan a menores contenidos hídricos.

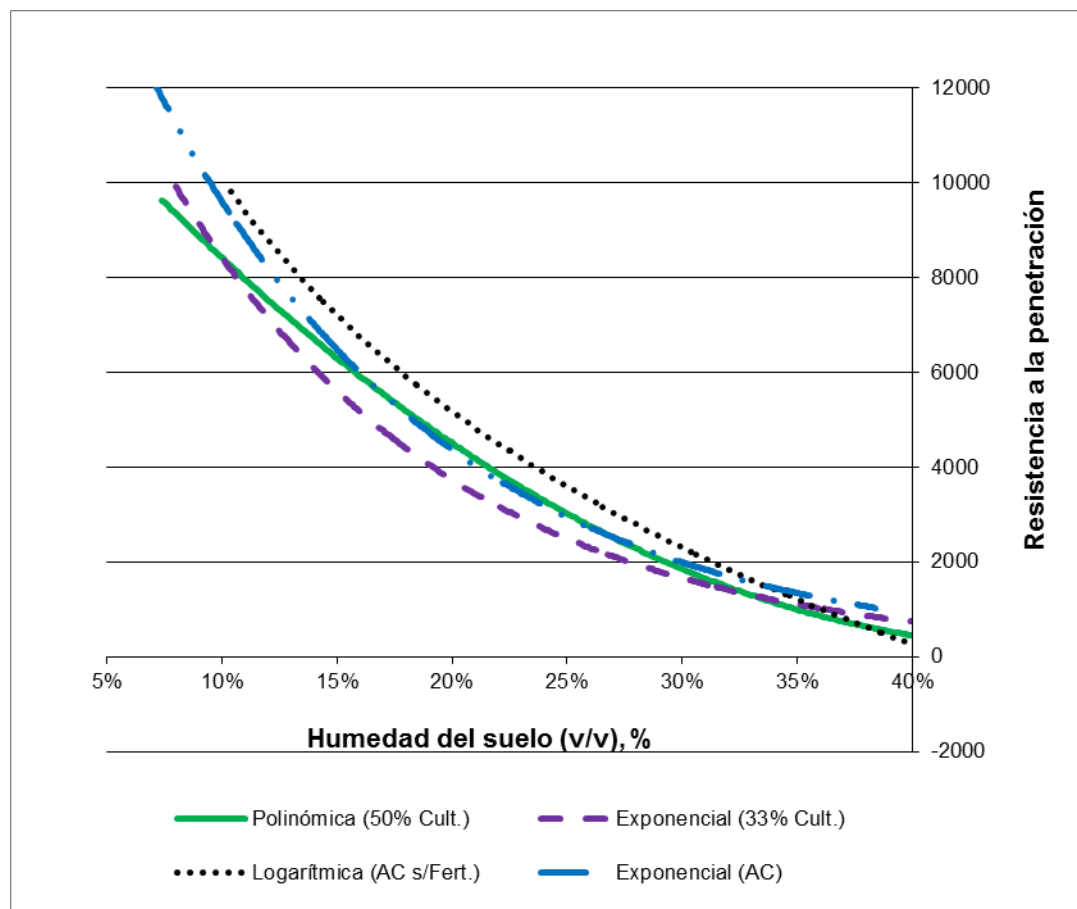
No se realizó análisis estadístico del límite de $\theta_{RP=2MPa}$ debido a que el ajuste de la curva de RP vs humedad se realizó para la totalidad de los cilindros obtenidos en cada tratamiento, resultando en un único valor de $\theta_{RP=2MPa}$ para cada tratamiento. Sin embargo, el orden de los valores de $\theta_{RP=2MPa}$ de los sistemas es coincidente con lo esperado según la bibliografía. En ésta se reporta que aquellos suelos con mayor Dap son los que presentan valores de RP más altos, y que a medida que transcurren los años de cultivos los valores de Dap y RP aumentan, mientras que al transcurrir los años de pasturas estos valores disminuyen (García Prechac, 2003).

En los ajustes de RP en función de la humedad volumétrica (figura 8), para todos los sistemas se observa que a mayores contenidos de humedad los valores de RP disminuyen. Esta disminución es máxima en el sistema de ACs/Fert, mientras que en el sistema de 33%Cult es mínima. Este

comportamiento fue similar al mencionado por Martino (2001), quien encuentra que en los suelos con mayor Dap los cambios de RP al disminuir el contenido hídrico son mayores.

Por otro lado, las diferencias en RP para los distintos sistemas no son iguales a lo largo de toda la curva, sino que a altos contenidos de humedad (mayores a 32%) las mismas son mínimas. Las mayores diferencias se observan a bajos contenidos de humedad. En los valores de humedad donde de RP es igual a 2 MPa hay diferencias entre los distintos sistemas.

FIGURA 8: Curva de resistencia a la penetración (RP) en función de la humedad para los distintos sistemas estudiados del experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela



Las ecuaciones de ajuste de los diferentes sistemas se muestran en la sección 3.3.2.1. de este trabajo

Los resultados muestran que tanto $\theta_{RP=2MPa}$ como $\theta_{10\%aire}$ siguen una tendencia lineal y consistente respecto a Dap (ver Anexos, figura 1). Sin embargo, este mismo comportamiento no se observó respecto a los restantes dos límites del IHO θ_{CC} y θ_{PMP} , los cuales mostraron un comportamiento errático respecto a Dap . En una revisión realizada por Da Silva y Kay (1997b) se encuentra que otros autores han reportado la falta de relación entre los límites relacionados con AD y la Dap .

4.3.2. Intervalo hídrico óptimo

En el siguiente cuadro se presentan los valores de IHO obtenidos para los diferentes sistemas del experimento de rotaciones.

CUADRO 9: Intervalo hídrico óptimo (IHO) según la intensidad de uso agrícola, medidos en el experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela

	IHO (cm ³ /cm ³)
ACs/Fert	0,02 B
AC	0,05 AB
50%Cult	0,07 A
33%Cult	0,08 A
Pr > F	0,02
N	12

Distintas letras en la columna indican diferencias significativas según Test de Tukey (alfa= 5%)

El tratamiento con menor IHO correspondió al sistema de ACs/Fert, y es seguido por el tratamiento AC, aunque no son estadísticamente distintos. Los tratamientos de rotación mixta dieron valores de IHO mayores, aunque no se diferencian estadísticamente entre sí, ni del tratamiento de agricultura continua con fertilización.

El rango de variación encontrado en el IHO fue de $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Estos valores se asemejan a los encontrados por Da Silva y Kay (1997b), quienes reportan valores de IHO de $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, para suelos con 32% de arcilla, 1,5% CO y valores de Dap que varían de 1,27 a $1,51 \text{ g}/\text{cm}^3$. Los resultados obtenidos concuerdan a su vez con lo reportado por Topp et al., citados por Calonego y Rosolem (2011), quienes plantean que para suelos pesados es frecuente encontrar valores de IHO cercanos a cero.

El IHO permitió evaluar el impacto de diferentes intensidades de uso sobre la calidad física del suelo, siendo más estrecho en los tratamientos con mayor degradación física. El indicador mostró la tendencia esperada según lo reportado por varios autores (Letey 1985, Da Silva y Kay 1997b, Zou et al. 2000, Verma y Sharma 2008). En tal sentido, los tratamientos de agricultura continua presentan los menores valores de IHO mientras que los que incluyen pasturas tienen valores más altos.

La inclusión de pasturas en la rotación, implica no sólo un mayor aporte de carbono orgánico al suelo, sino también menor tiempo de suelo descubierto, mayor productividad de los cultivos que siguen a las pasturas por el efecto residual en la disponibilidad de N del suelo, y una mayor resistencia del suelo a la erosión por mejorar las propiedades físicas del mismo (García Préchac, 2003). Todos estos efectos pueden estar explicando los mayores valores de IHO encontrados en los sistemas mixtos.

El IHO al igual que los indicadores clásicos de suelo, no muestra efecto del largo de la fase pasturas para diferenciar calidad física del mismo (50%Cult vs 33%Cult). De igual forma, tampoco encuentra efectos en la inclusión de pasturas si se compara con el sistema de AC. El IHO solamente permitió detectar diferencias cuando se contrastan sistemas que comprenden los dos factores, la rotación mixta y la fertilización (sistemas mixtos vs ACs/Fert).

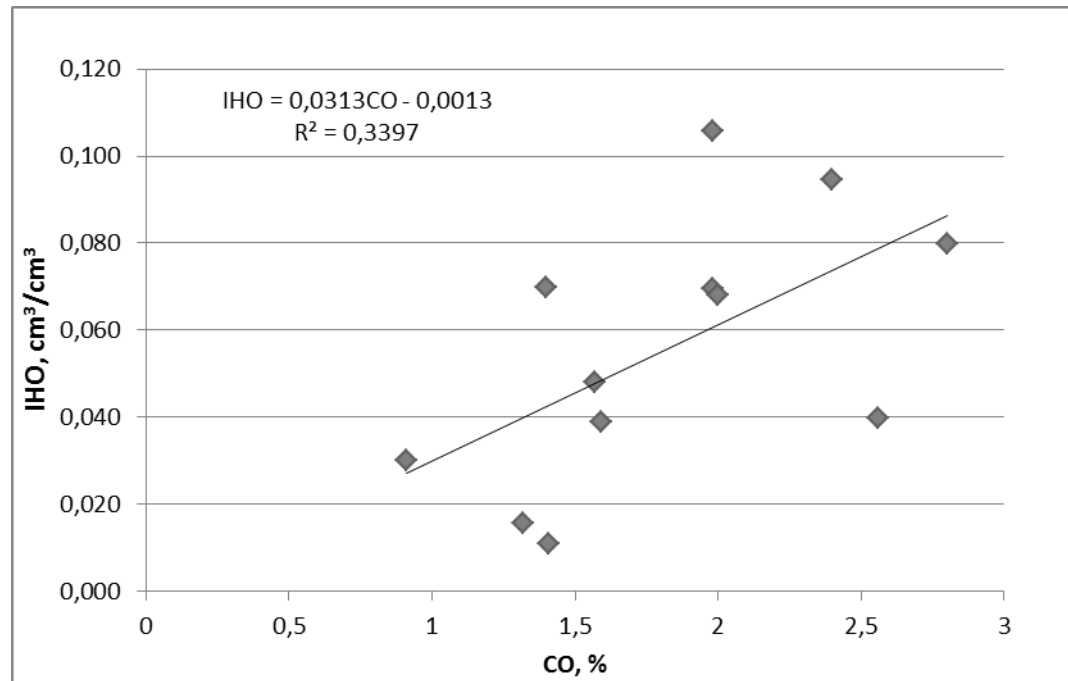
Considerando los factores que afectan a los límites del IHO era esperable que los efectos de aquellos tratamientos que no modifiquen ninguna de las propiedades básicas del suelo, como Dap, CO, Macroporos, de manera significativa no se reflejen en los valores del IHO, como es el caso de la inclusión de más años de pasturas en la rotación para este experimento.

En cuanto a la fertilización, Verma y Sharma (2008) compararon un tratamiento testigo sin fertilización, contra un tratamiento con el agregado de NPK, y encontraron una diferencia entre los tratamientos de un 32%. Para este experimento, la diferencia entre los tratamientos ACs/Fert y AC fue de 63%, aunque no estadísticamente significativa. Las tendencias de los resultados pueden estar explicadas por el mayor aporte de biomasa por parte de los cultivos del sistema AC ($0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) respecto al de ACs/Fert ($0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

4.3.2.1. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y el contenido de carbono orgánico

Da Silva y Kay (1997a) analizan el efecto del CO sobre el IHO, y encuentran que el primero tiene un efecto indirecto sobre el IHO al modificar la Dap. En el presente estudio los resultados obtenidos confirman que existe una relación positiva entre el IHO y el CO (figura 9).

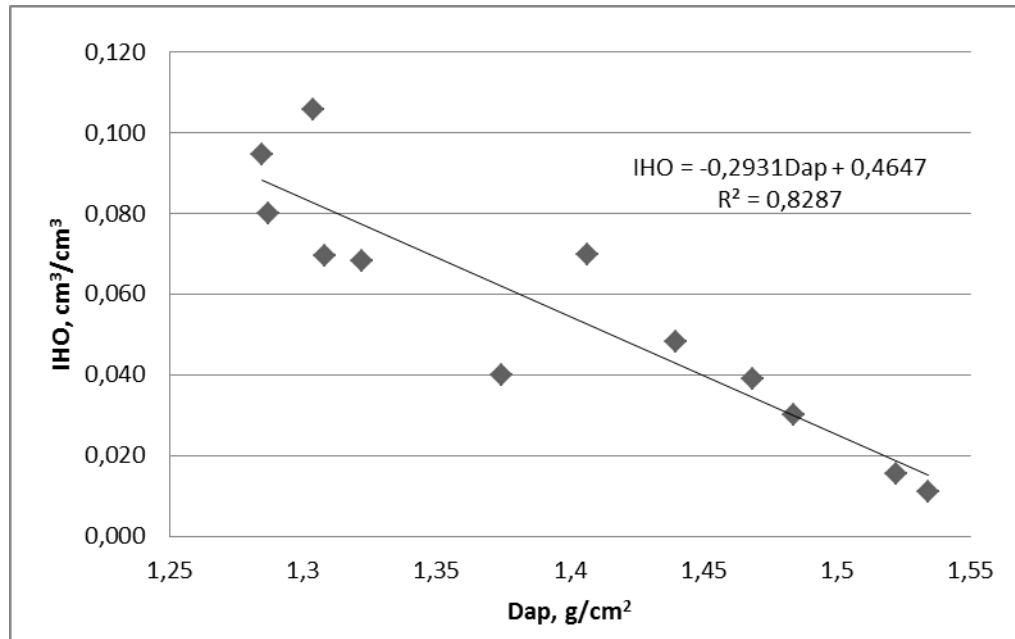
FIGURA 9: Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función del contenido de carbono orgánico del suelo (CO)



4.3.2.2. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y densidad aparente

En relación a la Dap, los resultados muestran una relación negativa entre el IHO y este parámetro (figura 10). Esto reafirma lo reportado por Zou et al. (2010), respecto a que el valor del IHO decrece con el aumento de la Dap. Da Silva et al. (1994) también indican este comportamiento para suelos de textura similar a los de este trabajo.

FIGURA 10: Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función de la densidad aparente del suelo (Dap)

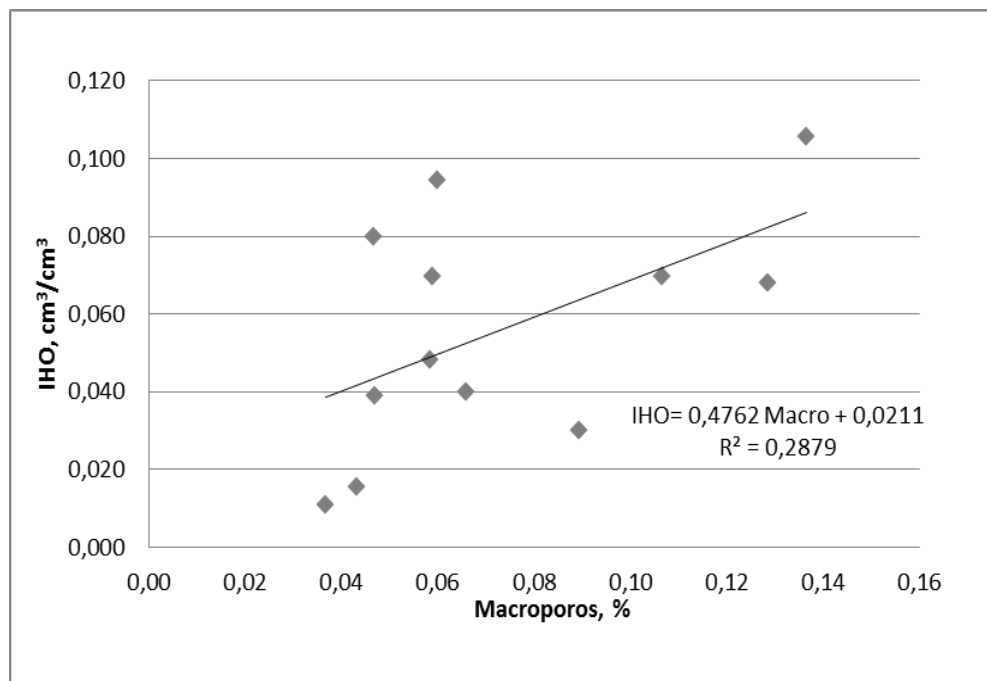


Considerando las curvas que se reportan en la bibliografía respecto a esta relación, se puede afirmar que el comportamiento observado corresponde al tercer segmento de la curva reportada por Tormena et al. (1999) y mostrada en la sección 2.3.1.1. En el mismo, pequeñas variaciones en Dap provocan cambios de mayor magnitud en el IHO. A pesar de que se encontraron altos valores de Dap, en ningún caso se superó la Dap crítica a partir de la cual el IHO se hace cero. De acuerdo a la función de ajuste de la curva, la Dap crítica sería 1,59 g/cm².

4.3.2.3. Relación entre el intervalo hídrico óptimo y macroporos

Los resultados muestran una relación lineal y positiva entre el IHO y macroporos (figura 11), si bien presenta un menor coeficiente de ajuste que con Dap o CO. Esta relación refleja la sensibilidad del IHO a los cambios en la estructura del suelo.

FIGURA 11: Intervalo hídrico óptimo (IHO) en función el contenido de macroporos del suelo



4.3.2.4. Límites que conforman el IHO, según tratamientos

Además de la tendencia del IHO a presentar mayores valores en los sistemas con pasturas, se observan diferentes importancias relativas en los límites que lo conforman, en relación a los sistemas de agricultura continua. Esto concuerda con lo reportado por Da Silva y Kay (1996), quienes encuentran que en suelos con diferencias en D_{ap} , textura y contenido de CO, el IHO varía tanto en su valor como en los límites que lo conforman.

En los sistemas de ACs/Fert y AC, con D_{ap} de 1,50 y 1,44 g/cm³ respectivamente, el límite inferior del IHO es $\theta_{RP=2MPa}$ en la mayoría de los

casos (4/6), estando sólo en dos casos limitado por θ_{PMP} . En los sistemas mixtos, con 50%Cult y 33%Cult, con Dap de 1,31 y 1,33 g/cm³, el porcentaje de casos en los que el límite inferior es $\theta_{RP=2MPa}$ se reduce a 2/6, siendo la mayoría de los casos limitados por θ_{PMP} (4/6). En cuanto al límite superior, en ambos sistemas de agricultura continua el 100% de los casos corresponde a $\theta_{10\%aire}$, mientras que en los sistemas mixtos este límite representa sólo en el 50% de los casos; y en los restantes limita θ_{CC} .

Que en los sistemas de mayor degradación limiten los parámetros nuevos que propone el IHO, en relación a AD, era esperable según lo reportado en la bibliografía, ya que estos límites son más sensibles a cambios en la Dap que θ_{CC} y θ_{PMP} (Da Silva y Kay, 1997a). En casi la totalidad de los casos (11/12) el IHO es menor que AD, lo que coincide con lo reportado por Topp et al., citados por Calonego y Rosolem (2010), para suelos de diferentes texturas. Esto está en línea con Letey (1985), quien argumentó que en suelos con peor estructura física y altas densidades aparentes las limitantes serán principalmente la aireación y la resistencia a la penetración.

La frecuencia de los límites está a su vez influenciada por las texturas pesadas de los suelos estudiados, los cuales son franco arcillosos. Varios autores han encontrado que las limitantes por aireación y resistencia a la penetración son más frecuentes a ser encontradas en estos suelos que en suelos de texturas más livianas, independientemente de la Dap.

4.4. RELACION IHO/AD

Como alternativa al valor absoluto del IHO es posible presentar el resultado en forma normalizada en base al AD como proponen Topp et al. (1994), quienes argumentaron que el indicador IHO/AD permitiría comparar distintos suelos.

CUADRO 10: Cociente IHO/AD, según la intensidad de uso agrícola medidos en el experimento rotaciones agrícola-ganaderas de INIA La Estanzuela.

	IHO/AD
ACs/Fert	0,21 C
AC	0,40 BC
50%Cult	0,55 B
33%Cult	0,85 A
Pr > F	0,0061
N	12

Distintas letras en la columna indican diferencias significativas según Test de Tukey (alfa= 5%)

En el cuadro 10 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del indicador IHO/AD. El tratamiento con el menor valor de IHO/AD es ACs/Fert (0,21), seguido por el de AC (0,40), aunque no se diferencian estadísticamente. El tratamiento 50%Cult (0,55) es mayor que el de ACs/Fert, pero igual al sistema de AC. El sistema de 33%Cult (0,85) es estadísticamente superior a los demás.

El indicador IHO/AD sigue la tendencia esperada según intensidad de uso y es el único indicador que permitió diferenciar estadísticamente los dos tratamientos con pasturas.

A pesar de estos resultados, para este trabajo, el indicador IHO/AD está condicionado además por la gran variabilidad encontrada en los valores de AD (cuadro 7). Esta variabilidad es la que puede explicar la capacidad de IHO/AD de discriminar los sistemas mixtos, ya que el valor de AD del tratamiento 33%Cult es muy bajo (en contra de lo que se esperaba encontrar para este sistema, que representaría el suelo de mayor calidad). Esto explica el alto valor IHO/AD de este sistema. Para este estudio en el que AD no presentó la misma tendencia que los demás indicadores de calidad física del suelo, se considera que no tiene sentido normalizar el IHO en base a éste, a pesar de que los resultados muestran la tendencia esperada.

Se encontraron además relaciones significativas entre el indicador IHO/AD y la Dap y el CO del suelo (ver Anexo, figuras 2 y 3). Esto coincide con lo reportado por Da Silva y Kay (1997a) quienes encontraron que este indicador seguía estando correlacionado a las propiedades básicas del suelo (arcilla, COS, Dap). Esto se contrapone con los argumentos de Topp et al. (1994) sobre la posibilidad de normalizar el IHO en base al AD. Por lo tanto los efectos de las propiedades del suelo siguen afectando este indicador, por lo que presentaría las mismas limitantes que el IHO frente a la comparación de suelos.

5. CONCLUSIONES

Se encontró que los indicadores clásicos evaluados, Dap, macroporos y CO, mostraron la tendencia esperada según la intensidad de uso agrícola, indicando mayores restricciones en aquellos sistemas con mayor intensidad de uso agrícola. El IHO mostró también esta tendencia, presentando los menores valores en los sistemas de mayor intensidad. De esta manera, el rango de valores promedio fue de 0,02 a 0,08 cm³/cm³, con un valor máximo para el tratamiento de 33%Cult y un valor mínimo para el tratamiento de ACs/Fert. Este rango de valores concuerda con lo reportado por la literatura, para suelos pesados de características similares a los suelos del litoral agrícola del Uruguay.

Los resultados de este estudio permiten concluir afirmativamente sobre la hipótesis de que el IHO permitiría reconocer cuantitativamente diferencias en calidad física del suelo. Sin embargo, las diferencias que encuentra este indicador no permiten una mayor discriminación entre los tratamientos que la Dap. Por lo tanto y dada la mayor complejidad de determinación del IHO respecto a la Dap, para este experimento no se puede concluir que el uso del IHO presente ventajas en la determinación de la calidad física del suelo.

A pesar de esto, el uso del IHO ofrecería ventajas frente a indicadores más simples, en la medida en que el valor determinado esté acompañado de los límites que lo conforman en cada caso, pues permitiría inferir sobre las restricciones al crecimiento vegetal que están operando. Así, para este experimento, la determinación del IHO permitió detectar que las limitaciones por aireación y resistencia a la penetración fueron más frecuentes en los suelos con mayor intensidad de uso agrícola.

Con respecto al concepto tradicional de contenido de agua disponible del suelo, se considera que el IHO resultaría en una mejor determinación del agua efectivamente disponible para las plantas, debido a que integra las limitaciones de aireación y resistencia a la penetración.

La estrecha relación que presenta el IHO con Dap podría ser utilizada para establecer valores interpretativos o niveles de referencia de Dap, que

estarían relacionadas con las principales restricciones físicas para el crecimiento de cultivos.

Por ultimo se cree preciso profundizar los estudios que relacionan el IHO con el crecimiento vegetal, de manera de potenciar su uso como indicador capaz de mejorar las predicciones de rendimiento de cultivos y/o para optimizar el manejo del riego.

6. RESUMEN

El intervalo hídrico óptimo (IHO) ha sido 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 contenido de agua del suelo, sobre el crecimiento vegetal. Se define como el contenido hídrico del suelo en el cual el crecimiento vegetal es menos limitado por estas restricciones. El objetivo del presente estudio fue evaluar el IHO bajo diferentes sistemas de rotación y fertilización conjuntamente con otras propiedades físicas de suelos. La hipótesis de trabajo es que el IHO es sensible ante situaciones contrastantes de uso de suelos. El experimento se desarrolló en INIA La Estanzuela, en el ensayo de largo plazo de rotaciones agrícola-ganaderas sobre un brunosol éutrico típico. Los tratamientos evaluados fueron: a) agricultura continua sin fertilización (ACs/Fert); b) agricultura continua fertilizada (AC); c) rotaciones mixtas con 50% del tiempo bajo cultivo y pastura respectivamente (50%Cult) y d) rotaciones mixtas con 33% del tiempo bajo cultivos (33%Cult). El IHO fue evaluado en el estrato de 5 a 10 cm, determinándose también otros indicadores clásicos de calidad física de suelo como densidad aparente (Dap), macroporosidad y contenido de carbono orgánico (CO). Se encontró que el IHO presentó tendencia a mayores valores a medida que la intensidad agrícola disminuía, siendo para el tratamiento de ACs/Fert $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para el sistema de 33%Cult. El indicador no mostró diferencias significativas debido al largo de la fase pasturas, permitiendo únicamente separar aquellos tratamientos que comprenden los dos factores, la rotación mixta y la fertilización (tratamientos mixtos vs ACs/Fert). Al comparar el IHO con Dap, como indicador clásico de calidad de suelo, se encuentra que el IHO no permite una mayor discriminación de los tratamientos. Esta observación y la mayor complejidad de determinación limitarían el uso potencial de este nuevo indicador. Sin embargo su fortaleza reside en la información adicional que brinda acerca de las restricciones físicas que están operando al crecimiento vegetal, cuando se analizan los límites que lo conforman.

Palabras clave: Indicador calidad física de suelos; Degradación; Intervalo hídrico óptimo; Rotaciones cultivo- pasturas; Resistencia a la penetración; Aireación.

7. SUMMARY

The least limiting water range (LLWR) has been proposed as an indicator of soil physical quality that integrates aeration, penetration resistance and soil water content effects on plant growth in a single parameter. It is defined as the soil water content at which plant growth is less limited by these restrictions. The objectives of this study were to evaluate the LLWR under different rotation and fertilization treatments along with other soil physical properties. The main hypothesis was that the LLWR is sensitive to changes in soil management and use practices. The research was conducted at INIA La Estanzuela, in a long-term crop pasture rotation treatment, on a *Brunosol éutrico típico*. The evaluated treatments were: a) continuous cropping without fertilization (ACs/Fert), b) fertilized continuous cropping (AC), c) mixed rotations with 50% of the time under crops (50% Cult) and d) mixed rotations with 33% of time under crops (33% Cult). The LLWR was measured at the 5 to 10 cm depth, and other classical indicators of physical quality such as soil bulk density, macroporosity and organic carbon content were also assessed. The tendency of the LLWR show higher values at lower cropping intensities, the lowest value was found at ACs/Fert treatment ($0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) and the highest one at 33% Cult treatment ($0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). No significant differences were found by the LLWR between mixed rotations. Only the inclusion of both factors, pasture and fertilization, showed statistical differences (mixed treatments vs. ACs / Fert). Comparing the LLWR with soil bulk density, as a classic indicator of soil quality, the LLWR does not allow greater discrimination within the treatments. In addition, the greater complexity of the LLWR determination limits the potential use of this new indicator. However, the extra information provided about the physical constraints that are operating on plant growth, can be considered a strength of this indicator.

Key words: Soil physical quality; Soil degradation; Least limiting water range; Crop- pasture rotations; Soil penetration resistance; Soil aeration.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. 1981. Modifying the root environment to reduce crop stress. 4th. ed. St. Joseph, Michigan, ASAE. 407 p.
2. ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A. R. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*. 166: 34- 41.
3. BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices; a biological perspective. *Geoderma*. 147: 159- 169.
4. BAVER, L. D.; GARDNER, W. T.; GARDNER, W. R. 1972. Soil physics. 4th. ed. New York, Wiley. 498 p.
5. BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*. 116: 137- 148.
6. BETZ, C. L.; ALLMARAS, R. R.; COPELAND, S. M.; RANDALL, G. W. 1998. Least limiting water range; traffic and long-term tillage influences in a wedster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62 (5): 1384-1393.
7. BOUYOUCOS, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464- 465.
8. BOWEN, H. D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: Arkin, G. F.; Taylor, H. M. eds. Modifying the root environment to reduce crop stresses. St. Joseph, Michigan, ASAE. pp. 21- 57.
9. BYRD, C. W.; CASSEL, D. K. 1980. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. *Soil Sci.* 129: 197- 204.

10. CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. 2011. Least limiting water range in soils under crop rotations and chielcing. R. Bras. Ci. Solo. 35: 759-769.
11. CAMPITELLI, P.; AOKI, A.; GUDELJ, O.; RUBENACKER, A.; SERENO, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. Ci. Suelo. 28 (2): 223- 229.
12. CANTÚ, M. P.; BECKER, A.; BEDANO, J. C.; SCHIAVO, H. F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Ci. Suelo. 25 (2): 173- 178.
13. CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; TOPP, G. C. 1999. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. Soil Sci. 164 (2): 101- 110.
14. CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. 2003. How do roots penetrate strong soil? Plant and Soil. 255: 93- 104.
15. DAMIANO, F.; MOSCHINI, R. C. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos argiudoles plantados con *Eucalyptus dunnii* maiden. Ci. Suelo. 29 (1): 1-11.
16. DA SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1775- 1782.
17. _____.; _____. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. Plant and Soil. 184: 323-329.
18. _____.; _____. 1997a. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 884- 888.
19. _____.; _____. 1997b. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 877- 883.

20. _____.; _____. 2004. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. *Soil and Till. Res.* 79: 167- 174.
21. _____.; _____.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. 2006. The least limiting water range of soil. *In: Lal, R. org. Encyclopedia of soil science.* New York, CRC. pp. 1026-1029.
22. DEXTER, A. R. 2004 Soil physical quality; I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma.* 120 (3-4): 201- 214.
23. GARCÍA PRÉCHAC, F. 2003. Propiedades físicas y erosión en los trabajos de larga duración de La Estanzuela. *In: Simposio 40 Años de Rotaciones Agrícolas-Ganaderas INIA La Estanzuela (2003, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados.* Montevideo, INIA. pp. 19- 23 (Serie Técnica no. 134).
24. GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. 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. Proc.* 32: 180- 186.
25. HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. 1955. Soil moisture studies of some Great Plains soils; II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and “minimun point” as related to 15- and 26- atmosphere percentages. *Soil Sci. Soc. Proc.* 19 (1): 20-26.
26. IMHOFF, S.; PIRES DA SILVA, A.; Ghiberto, P.; TORMENA, C. A.; PILATTI, M. A.; LIBARDI, L. 2012. Funciones de edafotransferencia para determinar el intervalo hídrico óptimo de suelos de la provincia de Santa Fe. *In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (23°, 2012, Mar del Plata, Argentina).* Actas. Mar del Plata, Mnemosyne. s.p.
27. KAY, B. D.; HAJABBASI, M. A.; YING, J.; TOLLENAAR, M. 2006. Optimum versus non- limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil and Till. Res.* 88: 42- 53.

28. KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. 2007. Rendimiento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. R. Bras. Ci. Solo. 31 (2): 221- 227.
29. LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. Soil and Till. Res. 78 (2): 151- 168.
30. LEAO, T. P.; DA SILVA, A. P. 2004a. A simplified Excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils. Sci. Agri. 61 (6): 649- 654.
31. _____.; _____.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. 2004b. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. R. Bras. Ci. Solo 28: 415- 421.
32. LETEY, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Advances in Soil Sci. 1: 277- 293.
33. MARTINO, D. L. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz Roselló, R. coord. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 225- 273 (Documentos)
34. MOHAMMADI, M. H.; ASADZADEH, F.; VANCLOOSTER, M. 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. Plant and Soil. 334: 221-233.
35. MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. 1993. Variabilidade da água disponível de una terra roxa estruturada latossólica. Sci. Agric. 50 (3): 404- 412.
36. 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). In: Simposio 40 Años de Rotaciones Agrícolas-Ganaderas INIA La Estanzuela (2003, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 1- 7 (Serie Técnica no. 134).

37. _____.; MOLFINO, J.; IBAÑEZ, V.; SAWCHIK, J.; CALIFRA, A.; LAZBAL, E.; LA MANNA, A.; MALCUORI, E. 2009. La calidad de los suelos en las principales áreas de producción lechera en Uruguay. *In*: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo; Impactos y Propuestas (2009, Montevideo, Uruguay). Resúmenes expandidos. Montevideo, INIA. pp. 31- 34 (Actividades de Difusión no. 587).
38. _____.; QUINCKE, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. *In*: Jornada Técnica de INIA La Estanzuela (2010, Mercedes, Uruguay). El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Montevideo, INIA. pp. 5-9 (Actividades de Difusión no. 605).
39. ORELLANA, J. 1990. Impedimentos mecánicos al desarrollo vegetal; costras, pisos de arado y horizontes texturales. *FAVE-Ci. Agr.* 4-5 (1): 25- 39.
40. _____. 2009. La estructura en suelos de tierra fina. *FAVE- Ci. Agr.* 8 (2): 61- 109.
41. PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A. N.; DE ALMEIDA, C. X.; PEREIRA, F. S. 2010. Physical quality of an oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the precropping period. *R. Bras. Ci. Solo.* 34 (1): 211- 217.
42. PILATTI, A.; ORELLANA, A. 2000. The ideal soil; II. Critical values of an "ideal soil" for mollisols in the north of the pampean region (in Argentina). *J. of Sust. Agri.* 17 (1): 89- 112.
43. QUINCKE, J. A.; PÉREZ- GOMAR, E. 2010. Ajuste de una metodología para determinar la curva de resistencia a la penetración versus humedad del suelo utilizando muestras imperturbadas. *In*: Taller de la Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo- ISTRO Uruguay (3º., 2010, Bastión del Carmen, Uruguay). Posters. s. n. t. s. p.
44. REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. 2002. Indicators of good soil physical quality; density and storage parameters. *Geoderma.* 110: 131- 144.

45. RUSSELL, S. 1977. Plant root system; their function and interaction with the soil. London, Mc Graw- Hill. 298 p.
46. SILVA BARBOZA, F. D. 2011. Funções de pedotransferencia para solos do sul do Uruguai. Tesis de Maestría Ing. Agr. Santa María, Brasil. Universidad Federal de Santa María. 90 p.
47. TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. J. 1966. Soil strength- root penetration relations for medium- to coarse- textured soil materials. Soil Sci. 102 (1): 18- 22.
48. TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G.; Carter, M.R. eds. Soil quality for crop production and ecosystem health. New York, Elsevier. pp. 21- 58 (Developments in Soil Science no. 25).
49. TORMENA, C. A.; DA SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Soil and Till. Res. 52: 223-232.
50. VERMA, S.; 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 Till. Res. (1): 1-9.
51. WILSON, M. G.; SASAL, M. C.; CAVUGLIA, O. 2008. Densidad de suelo crítica para la productividad de un molisol y un vertisol. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (21°, 2008, Potrero de los Funes, Argentina). Actas. s. n. t. s. p.
52. WRIGHT, A. F., 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. Com. in Soil Sci. and Plant Analysis. 32 (19- 20): 3243-3258.
53. WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; MC CULLOUGH- SANDEN, B.; MARKEGARD, G. 2003. Soil management effects on the nonlimiting water range. Geoderma. 114: 401- 413.

54. ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. 2000. Least limiting water range; a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.* 38: 947- 958.

9. ANEXOS

ANEXO 1- Valores críticos utilizados por diferentes autores revisados, y referencia citada para los límites en dichos trabajos.

AUTOR	CAPACIDAD DE CAMPO	PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE	RESISTENCIA A LA PENETRACION	AIREACION
Benjamin et al. (2003)	-33 MPa s.r.	-1,5 MPa s.r.	2 MPa s.r.	10% s.r.
Betz et al. (1998)	-0,01MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Richards et al. (1944)	2 MPa Taylor et al. (1966)	10% Grable y Siemer (1968)
Calonego y Rosolem (2011)	-0,01MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Richards et al. (1944)	2 MPa Taylor et al. (1966)	10% Grable y Siemer (1968)
Da Silva et al. (1994)	-0,01 MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Richards et al. (1944)	2 MPa Taylor et al. (1966)	10% Grable y Siemer (1968)
Lapen et al. (2004)	-0,01 MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Richards et al. (1944)	3 MPa Lipiec y Hakansson (2000)	10% Grable y Siemer (1968)
Pereira et al. (2010)	-0,01 MPa s.r.	-1,5 MPa s.r.	2 MPa s.r.	10% s.r.

Tormena et al. (1999)	-0,01 MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Savege et al. (1996)	2 MPa Taylor et al. (1966)	10% Grable y Siemer (1968)
Verma y Sharma (2008)	-0,01 MPa s.r.	-1,5 MPa s.r.	2 MPa Da Silva et al. (1994)	10% s.r.
Wu et al. (2003)	-0,01 MPa Haise et al. (1955)	-1,5 MPa Richards et al. (1944)	2 MPa Taylor et al. (1966)	ODR = 0,2 $\mu\text{gcm}^{-3}\text{min}^{-1}$ Letey (1967)
Zou et al. (2000)	-0,01MPa s.r.	-1,5 MPa s.r.	3 MPa s.r.	10% s.r.

ODR= Oxigen Difussivity Rate o Tasa de Difusividad del Oxígeno; s.r. = Sin referencia citada.

ANEXO 2- Variación de $\Theta_{RP=2MPa}$, $\Theta_{10\%aire}$, Θ_{CC} y Θ_{PMP} , con respecto de la densidad aparente (D_{ap}), para el rango de D_{ap} evaluados en el trabajo.

