

CAMBIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE LABOREO EN UN ENSAYO DE LARGA DURACIÓN

Martín-Lammerding, D.^{a*}, Tenorio, J.L.^a, Gabriel, J.L.^a y Bienes, R.^b

^a INIA-INAGEA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria), Dpto. Medio Ambiente y Agronomía, Ctra. de la Coruña km 7.5, 28040 Madrid.

^b IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario), Dpto. Investigación Aplicada y Extensión Agraria, Finca El Encín, Autovía del Noreste A-2, km. 38.2, 28805 Alcalá de Henares, Madrid.

*autor para la correspondencia

Palabras clave: Agricultura de Conservación, largo plazo, agua disponible, propiedades hidráulicas del suelo, van Genuchten.

Key words: Conservation Agriculture, long-term, soil water availability, soil hydraulic properties, van Genuchten

RESUMEN

En un ensayo de Agricultura de Conservación de larga duración localizado en Alcalá de Henares se evaluaron varias propiedades de suelo relacionadas con el movimiento y retención del agua en el suelo. Para ello se realizaron medidas de infiltración y se tomaron muestras inalteradas de suelo en distintos tratamientos de laboreo (tradicional, mínimo y no laboreo) y de rotación de cultivos (barbecho-trigo-leguminosa-cebada) en 2013 y 2018. En las muestras inalteradas se determinó: la porosidad total, la macro, meso y microporosidad, la densidad aparente y la capacidad de retención de agua. Además se tomaron medidas de infiltración de agua. Se encontraron diferencias entre las dos fechas de muestreo y entre las parcelas de monocultivo de trigo y las de rotación, mientras que no se encontró un efecto claro del sistema de laboreo. Parece que un mejor desarrollo del cultivo y de sus raíces fueron decisivos a la hora de mejorar algunas de las propiedades hidráulicas medidas.

ABSTRACT

We evaluated several hydraulic properties related to water movement and retention in a long-term Conservation Agriculture experimental field located in Alcalá de Henares. For this purpose, we measured water infiltration and we took undisturbed soil samples from different soil tillage treatments (conventional, minimum and no-tillage) and different crop rotation (fallow-wheat-legume-barley) in 2013 and 2018. In undisturbed soil cores, we measured total porosity, macro, meso and microporosity, bulk density and available water content. Additionally soil water infiltration measurements were taken. We found significant differences between both sampling dates and between the monoculture and the rotation. However, no significant effect was found among tillage treatments. A better crop and roots development may have been the reason for the enhancement of some of the measured hydraulic properties.

1. Introducción

La disponibilidad de agua es un factor determinante en la producción de los cultivos, sobre todo en condiciones de secano y en climas áridos o semiáridos; además los modelos de escenario de cambio climático prevén cada vez menos precipitación total en las regiones del Mediterráneo (Kaye y Quemada, 2017) y en concreto en la zona centro de España, se han incrementado significativamente la intensidad de las lluvias (García-Díaz y col., 2015). Por lo tanto, por una parte hay que favorecer el proceso de entrada de agua en el suelo (infiltración) y por la otra maximizar la capacidad de retención de agua disponible en el mismo (AWC). La distribución del tamaño de los poros del suelo, su conectividad y su tortuosidad se relacionan con estos procesos de infiltración de agua, de retención y de drenaje. La velocidad de infiltración está controlada por la distribución del tamaño de los poros, por su continuidad y por los caminos de flujo preferencial (Kutílek, 2004). Los macroporos (o poros no-capilares) están relacionados con el movimiento de aire y agua en el suelo y, pese a representar una pequeña fracción de la porosidad total, el flujo a través de ellos domina en estados cercanos a la saturación del suelo (Lin y col., 1996). La infiltración de agua en un suelo seco ocurre inicialmente a gran velocidad que disminuye conforme se va humedeciendo, llegando a un valor más o menos constante, cercano a la conductividad hidráulica en medio saturado en campo (k_{fs}). Por otra parte, los microporos (o poros capilares) tienen la capacidad de almacenar agua pero que no es demasiado accesible a su absorción por las raíces del cultivo. La AWC de un suelo se suele definir como la diferencia entre la humedad a capacidad de campo (FC) y la humedad en el punto de marchitez (WP), considerando FC como la humedad a un potencial mátrico de -33kPa y WP la humedad a -1500 kPa, aunque estos valores son arbitrarios y varían ligeramente entre autores (Hillel,

1998). Tanto factores abióticos (e. g. laboreo, secado-humectación, congelación-descongelación) como bióticos (e. g. raíces, lombrices) influyen en el tamaño, forma y continuidad de los poros (Kay y VandenBygaart, 2002). Mediante determinadas prácticas agronómicas de manejo (como las de Agricultura de Conservación, AC) se pueden favorecer la infiltración y la cantidad de agua disponible en la zona radical. El laboreo es la práctica de manejo más ampliamente estudiada por modificar las propiedades hidráulicas y otros procesos en el campo (Green y col., 2003). Al reducir la intensidad de laboreo, suele haber un aumento inicial de la densidad aparente y, consecuentemente, una disminución en la porosidad total (Moret y Arrúe, 2007); pero a largo plazo suele aumentar el contenido en materia orgánica, la estabilidad de los agregados, cambiar la distribución del tamaño de poros (sin variar la porosidad total), aumentar la conectividad de los macroporos y frecuentemente aumenta la capacidad de retención de agua (Green y col., 2003; Strudley y col., 2008). Además en AC se mantiene el suelo cubierto (mínimo un 30%) con los restos de cosechas anteriores. Este acolchado protege la superficie del golpeteo de las gotas de agua, reduciendo el riesgo de formación de costra. Además, al no labrar, no se destruyen los canales creados por raíces y lombrices, favoreciendo el flujo preferencial de agua. Todo ello favorece la infiltración y reduce las pérdidas por escorrentía.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de las prácticas agronómicas de conservación comparándolas con las prácticas tradicionales de manejo del suelo sobre la capacidad de infiltración y la retención de agua en el suelo después de 25 años.

2. Material y métodos

El ensayo experimental se encuentra situado en la finca del INIA de “La Canaleja”, en Alcalá de Henares (40° 32'N, 3° 20'W; 600 m.s.n.m). La zona se caracteriza por un clima Mediterráneo semiárido, tipo Bsk en la escala de Köppen-Geiger (Peel y col. 2007), con una media de precipitaciones de 353 mm año⁻¹ (período 1994-2018). El suelo se clasificó dentro del subgrupo *Haploxeralf cálcico* (Soil Survey Staff, 2014) con clase textural franco arenosa, pobre en materia orgánica, pH cercano a 8 y sin características salinas. El ensayo de Agricultura de Conservación comenzó en 1994 y desde entonces se mantienen los mismos sistemas de laboreo para estudiar su efecto en el largo plazo: No Laboreo (NL), Mínimo Laboreo (ML) y el Laboreo Tradicional (LT). Desde 2010 se compara un monocultivo de trigo (*Triticum aestivum* vars. Astral o Marius) con una rotación de 4 años: barbecho- trigo - leguminosa [guisante (*Pisum sativa* var. Déclíc) o veza (*Vicia Sativa* var. Senda)- cebada (*Hordeum*

vulgare vars. Kika o Vinagrosa)]. Estas parcelas se distribuyen en forma de split-plot, donde el tratamiento principal es el tipo de laboreo y el secundario el monocultivo vs. la rotación (para un total de 15 parcelas por bloque, cada una de ellas de 10 x 25 m²), y todo ello replicado en 4 bloques. Cada año, dos semanas antes de la siembra (sobre noviembre según las condiciones del terreno), se pasa una vertedera hasta 20 cm de profundidad y después un cultivador para preparar el lecho de siembra en las parcelas en LT; en ML se dan dos pases con un cultivador tipo chisel a 15 cm de profundidad; en NL se hace un tratamiento de control de malas hierbas con glifosato (Sting, Monsanto, 3 L ha⁻¹) y la siembra se hace de forma directa sobre el rastrojo del año anterior. La fertilización en sementera de los cereales consiste en 200 kg ha⁻¹ de un fertilizante mineral compuesto (8/24/8, N/P/K). En todas las parcelas se realiza un tratamiento de control de malas hierbas en post-emergencia con Metsulfuron metil (30 g ha⁻¹) y cloquintocet-mexyl pinoxaden (850 mL ha⁻¹) a finales de febrero según las necesidades. En abril se realiza la fertilización en cobertera del cereal en función del contenido en N disponible del suelo, las necesidades del cultivo y el rendimiento esperado (3-4 Mg grano ha⁻¹ y extracción de 26-28 kg N Mg⁻¹ grano) y se añaden cantidades variables de nitrosulfato amónico al 27% de N. Las leguminosas se cortan en fresco en mayo de cada campaña, mientras que los cereales se cosechan a finales de junio. Los valores de biomasa vegetal se obtuvieron de recoger una superficie de 0.7 x 0.7 m de cada parcela. Los residuos de la cosecha se pican y se dejan sobre la superficie del suelo, independientemente del tratamiento.

Las medidas de infiltración se realizaron el 1 de julio de 2013 y el 21 de junio de 2018 en 12 parcelas del ensayo, las correspondientes al monocultivo de trigo en los tres sistemas de laboreo y cuatro bloques. Se usó el método del anillo simple (25 cm de diámetro interno) añadiendo el agua equivalente a 25 mm de altura hasta que se estabilizó el tiempo en infiltrar el agua (Bouwer, 1986). Se realizaron un mínimo de 3 repeticiones por parcela. La curva de velocidad de infiltración se obtuvo tras ajustar los datos de infiltración (y, mm h⁻¹) frente al tiempo acumulado (x, tiempo, h) a una curva tipo $y=k_{fs} \cdot x^a$. La conductividad hidráulica vertical es el valor de infiltración estabilizado o final.

Para determinar la densidad aparente y la distribución del tamaño de poros se recogieron muestras de suelo inalterado con unos cilindros biselados de 50 mm de diámetro y volumen de 100 cm³ a dos profundidades: de 2-7 cm y de 15-20 cm. Los muestreos de suelo se realizaron el 13 de mayo de 2013 y el 22 de mayo de 2018 en 24 parcelas fijas del ensayo (correspondiendo con 12 parcelas en monocultivo de trigo y 12 parcelas en rotación para cada uno de los cuatro bloques y de los tres tratamientos de laboreo).

Estas parcelas de la rotación estaban cultivadas de cebada en el muestreo de 2013 y se encontraban en barbecho en 2018. Los cilindros se humedecieron hasta saturación por capilaridad (se midió la humedad a saturación) y se fueron aplicando diferentes valores de potencial mátrico en distintos sistemas en función del valor de succión a aplicar: los valores de potencial mátrico de -0.10, -0.25, -1.00, -3.1, -6.2 y -10 kPa se aplicaron colocando los cilindros de muestra de suelo inalterada en una caja de arena (Eijkkelkamp, The Netherlands) y los valores de -33, -196, -780 y -1500 kPa se aplicaron en una olla con las muestras inalteradas colocadas sobre una membrana de Richards (Richards, 1947, 1949). De forma que para cada valor de potencial mátrico (Ψ) se obtuvo un valor de humedad de suelo (θ). La densidad aparente (DB, Mg m^{-3}) se calculó como el peso de suelo seco en estufa (a 105°C) dividido entre el volumen del cilindro (Blake and Hartge, 1986). Los parámetros hidráulicos θ_r (humedad residual), θ_s (humedad en saturación), α , n de la curva de van Genuchten (1980) se obtuvieron del ajuste de los contenidos en humedad medidos a los distintos puntos de potencial mátrico de cada cilindro recogido con el programa RETC (versión 6.02). Una vez obtenidos estos parámetros hidráulicos se recalcularon los valores de humedad para los valores de potencial mátrico de interés, e.g. FC (-33 kPa) y WP (-1500 kPa), el agua disponible ($\text{AWC}=\text{FC}-\text{WP}$) y se calcularon el porcentaje de macro-poros como aquellos entre la humedad en saturación y -6.2 kPa y los meso-poros entre -6.2 y -33 kPa. La micro-porosidad (< -33 kPa) coincide por lo tanto con el valor de FC. Además de los anillos con muestra inalterada, se recogieron muestras de suelo que se secaron al aire, se tamizaron ($<2\text{mm}$) y se molieron para realizar análisis de carbono orgánico (SOC) mediante el método de oxidación húmeda (Nelson y Sommers, 1996).

3. Resultados

Como se observa en la Tabla 1, los años en los que se muestreó fueron bastante diferentes, siendo 2018 bastante más lluvioso sobre todo los primeros meses del año y justo antes de los muestreos y mediciones que se realizaron durante los meses de mayo de 2013 y 2018. Los valores de humedad en los primeros 15 cm de suelo fueron de media $0.096 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en mayo de 2013, mientras que en mayo de 2018 fueron superiores, alcanzando los $0.190 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de media. No se observaron diferencias significativas en los valores de humedad de suelo entre los tratamientos.

Tabla 1 Lluvia mensual caída (mm) durante las dos campañas en las que se tomaron las muestras

	2012-2013	2017-2018
	mm	
Octubre	90.0	26.5
Noviembre	57.3	3.9

Diciembre	3.8	16.3
Enero	32.9	46.1
Febrero	9.6	42.3
Marzo	76.8	110.3
Abril	56.9	52.9
Mayo	32.6	49.4
Junio	9.1	26.7
Julio	0.6	0.0
TOTAL	369.6	374.4

La biomasa vegetal producida por los cultivos varió significativamente entre los dos años (Tabla 2) siendo de media mayor en 2013 que en 2018 y mayor en el monocultivo que en las parcelas de la rotación.

Tabla 2 Biomasa vegetal producida el año anterior y el mismo de los muestreos de suelo. Letras minúsculas indican diferencias significativas entre años para una misma rotación y letras mayúsculas indican diferencias significativas entre MONO y ROT para un mismo año $p < 0.05$.

AÑO	cultivo MONO	Biomasa	cultivo ROT	Biomasa
		(kg d.m ha^{-1})		(kg d.m ha^{-1})
2012	trigo	938.6 Bc	veza	2572.7 Aa
2013	trigo	2310.8 a	cebada	2640.5 a
2017	trigo	1311.0 Bb	cebada	2503.0 Aa
2018	trigo	1438.5 Ab	barbecho	0.0 Bb

Conductividad hidráulica saturada en campo

La conductividad hidráulica en saturación varió de forma muy significativa entre las fechas de medida, siendo los valores mayores en 2013 (168.7 mm h^{-1}) que en 2018 (99.4). Los valores de k_{fs} de las parcelas en LT y en NL fueron significativamente más altos en 2013 que en 2018, mientras que k_{fs} en ML fue similar en las dos fechas de medida. No se encontraron diferencias significativas entre sistemas de laboreo.

Densidad aparente y parámetros de la ecuación de la curva de retención de agua en el suelo de van Genuchten

La densidad aparente (BD) fue significativamente menor en el muestreo de 2018 que en el de 2013 y significativamente menor en la superficie que entre 15 y 20 cm (Tabla 3). En cuanto al sistema de laboreo, el tradicional (LT) presentó un valor de DB significativamente menor que el no laboreo y el mínimo laboreo.

Tabla 3 Valores medios y análisis de la varianza de la densidad aparente (DB) y de los parámetros de las curvas de van Genuchten. (solo se muestran los efectos principales; ns: no significativo $p > 0.1$)

	SOC (g kg ⁻¹)	BD (Mg m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n
	Pr > F				
Fecha	ns	0.0018	ns	0.0026	<0.0001
2013	7.01	1.63 a	0.402	0.014 b	1.34 a
2018	7.27	1.55 b	0.408	0.025 a	1.24 b
Profundidad	<0.0001	0.0445	0.0057	0.0049	<0.0001
2-7 cm	8.30 a	1.56 b	0.417 a	0.024 a	1.34 a
15-20 cm	5.97 b	1.62 a	0.394 b	0.014 b	1.23 b
Laboreo	<0.0001	0.0020	0.0010	ns	ns
LT	6.00 b	1.53 b	0.427 a	0.022	1.28
ML	6.28 b	1.60 ab	0.398 b	0.016	1.31
NL	9.13 a	1.64 a	0.390 b	0.019	1.27
Rotación	ns	ns	0.0028	ns	ns
mono	7.16	1.58	0.418 a	0.018	1.30
rot	7.12	1.60	0.393 b	0.021	1.27

Los valores de humedad residual (θ_r) obtenidos por el ajuste de van Genuchten resultaron en su mayoría valores de 0. El contenido en humedad a saturación (θ_s) fue significativamente mayor en superficie que entre 15-20 cm. θ_s fue mayor en LT comparado con ML y NL y fue mayor en las parcelas en monocultivo comparado con las de la rotación. El parámetro α fue significativamente mayor en 2018 que en 2013 y mayor en la superficie que a mayor profundidad. Lo más destacable sobre el parámetro n fue que la interacción fecha*profundidad fue muy significativa y que presentó el valor más alto en la zona superficial durante 2013 (1.45).

Capacidad de campo y punto de marchitez

La macroporosidad fue de media del 5.0 % y varió significativamente con la profundidad y su interacción con la fecha. En superficie, la macroporosidad fue del 6.4 % comparado con el 3.7 % de la zona entre 15-20 cm. El porcentaje de macroporos en profundidad durante 2013 fue el más bajo (sólo el 2.9 %). Independientemente de la profundidad, tanto FC como el WP aumentaron de 2013 a 2018, de 0.258 a 0.281 m³ m⁻³ la FC y de 0.104 a 0.140 m³ m⁻³ el WP con lo que el agua disponible (AWC=FC-WP) disminuyó de 0.153 a 0.141 m³ m⁻³. Independientemente de la fecha de muestreo, FC fue mayor en profundidad (0.285 m³ m⁻³) comparado con la superficie (0.254), mientras que WP no varió, siendo AWC superior en profundidad (0.159 m³ m⁻³) comparado con la zona superficial (0.135). Como se observa en la Fig. 1, los menores valores de FC y WP se encontraron en la zona superficial en el muestreo de 2013. La humedad a capacidad de campo fue significativamente menor en NL y ML (de media 0.263 m³ m⁻³) que en LT

(0.281 m³ m⁻³). Independientemente de la fecha de muestreo, el agua disponible fue, en general, mayor en LT (0.153 m³ m⁻³) que en NL (0.139), sobre todo entre 15 y 20 cm de profundidad.

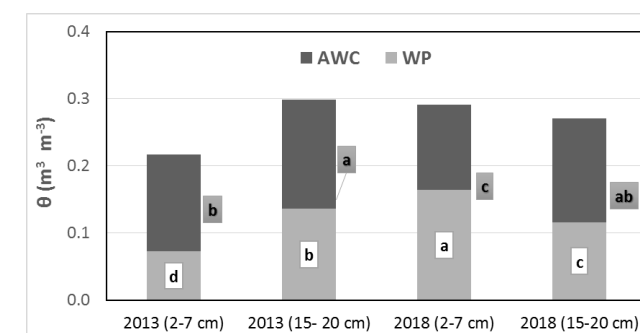


Fig. 1 Punto de marchitez (WP) y agua disponible (AWC) en función de la profundidad en los dos años de muestreo. Las letras indican diferencias significativas entre las medias de WP y AWC ($p < 0.05$).

Los valores de FC y de AWC fueron significativamente mayores en las parcelas en monocultivo comparado con las de la rotación, siendo AWC en las parcelas en monocultivo del 0.154 m³ m⁻³ y en las de rotación de 0.140 m³ m⁻³.

Curvas de retención de humedad

Como se observa en las gráficas (Fig. 2), las diferencias en la forma de las curvas ocurrieron principalmente en la zona superficial del suelo, en valores de potencial mátrico entre -100 y -10,000 kPa y entre las dos fechas de muestreo principalmente. Las diferencias entre sistemas de laboreo ocurrieron a humedades cercanas a saturación, como ya se ha comentado con θ_s .

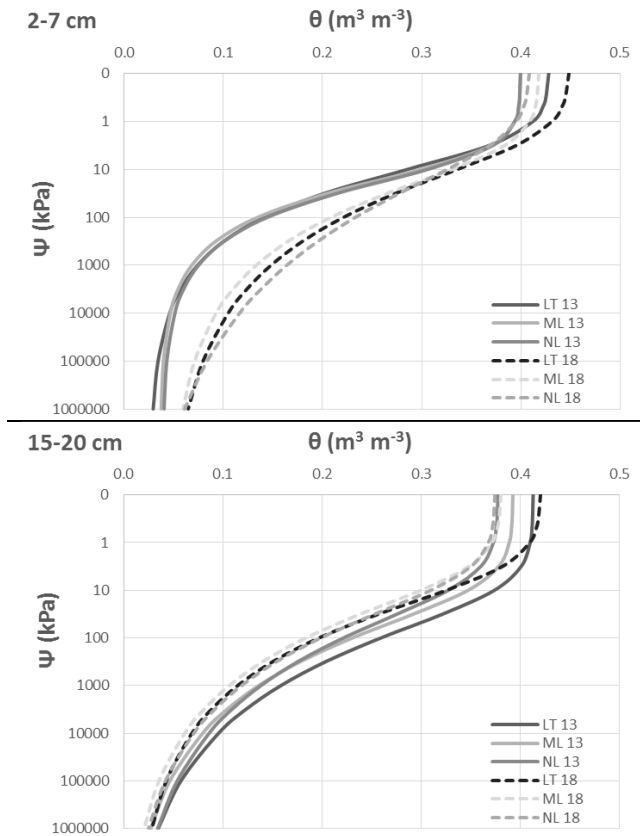


Fig. 2 Curvas potencial mátrico-humedad (Ψ - θ) según ajuste de van Genuchten-Mualem en función del sistema de laboreo para las dos fechas de muestreo y la profundidad (2-7 y 15-20 cm).

4.- Discusión

Influencia de la fecha de muestreo

Las diferencias entre los dos años de muestreo fueron notables, ya que 2013 fue un año seco mientras que 2018 fue un año de lluvias intensas en primavera, sin embargo en 2013 los cultivos se desarrollaron mejor que en 2018 ya que se obtuvo una mayor biomasa vegetal en cosecha. Estas diferencias pudieron deberse a una mayor presencia de malas hierbas en 2018 aprovechando las lluvias y que al final compitieron con el cultivo (por agua y/o nutrientes) resultando en menores valores de biomasa. El mejor desarrollo del cultivo durante 2013 pudo venir acompañado de un mejor desarrollo radical en general, o a mayor profundidad en busca de agua, lo que pudo ser la razón de los mejores valores de infiltración obtenidos en 2013 comparado con 2018 al favorecerse el flujo preferencial de agua. El aumento en la porosidad total ocurrido de 2013 a 2018 (y disminución de la BD) se debió sobre todo a un aumento en el porcentaje de microporos (con lo que aumentó el valor de FC) y, en menor medida, a los macroporos. Un ligero aumento en los valores de SOC pudo deberse al aumento en la microporosidad, ya que se encontró una correlación positiva ($p=0.014$) entre ellas. El aumento del

parámetro α de van Genuchten y la disminución de n de 2013 a 2018 indica que en estos 5 años se desarrolló una nueva macro-estructura, además se encontraron correlaciones entre el valor de α , la θ_s y la propia macroporosidad.

Influencia del laboreo

En este ensayo, después de 25 años de manejo diferenciado del suelo esperábamos encontrar diferencias entre los sistemas de laboreo en las propiedades hidráulicas del suelo. Sin embargo, las medidas de infiltración fueron similares entre tratamientos, al contrario de lo que encontraron otros autores, los cuales observaron una mayor conductividad hidráulica en suelos franco-arenosos no labrados (Azooz y Arshad, 1996). Además, estos valores de infiltración no correlacionaron positivamente con los de la porosidad total (o negativamente con la BD) como esperábamos. Por lo tanto, en este ensayo, no hemos detectado un aumento en flujo preferencial en las parcelas de NL debido a canales de lombrices y/o de raíces muertas, etc. comparado con las de LT. Los valores más altos de BD encontrados en las parcelas en AC (NL y ML) comparado con los de LT apuntan a un posible problema de compactación. Este hecho junto a que el pase de vertedera se realice solo hasta 20 cm de profundidad y de que no se retiren los restos de biomasa de los cultivos en LT, pueden estar enmascarando algunos de los potenciales impactos de la reducción del laboreo en las propiedades hidráulicas del suelo. Por otra parte, las parcelas en NL acumularon una mayor cantidad de SOC comparado con LT y ML, debido sobre todo a una menor pérdida de los restos de la cosecha por mineralización al haber una menor aireación del suelo al no labrar. Además, en trabajos anteriores, se encontró una mayor estabilidad de los agregados, mayores contenidos de biomasa microbiana, de materia orgánica particulada y una mayor actividad enzimática en las parcelas en NL que bajo LT (Martín-Lammerding y col., 2015 y 2011). Sin embargo, ni el aumento en la cantidad de materia orgánica del suelo ni la mejoría en las propiedades biológicas del suelo en NL han llegado a repercutir en una mejoría significativa en las propiedades hidráulicas.

Influencia de la rotación

La presencia o no de un cultivo y su propio desarrollo y de sus raíces sí que influyeron en algunas de las propiedades medidas, como la humedad en saturación, la porosidad total y la micro-porosidad, las cuales fueron más altas en las parcelas sembradas de forma continuada con trigo que en las de rotación. Las raíces ejercen presión y además generan un efecto de humectación-desección en la rizosfera que puede mejorar algunas propiedades como por ejemplo la microporosidad (Scanlan, 2009; Bodner y col., 2014).

5.- Conclusiones

En suelos de zonas semiáridas, con texturas franco-arenosas, de baja fertilidad y producciones, el hecho de labrar con mayor o menor intensidad durante 25 años consecutivos no tuvo una influencia significativa en las propiedades hidráulicas medidas como habríamos esperado. Sin embargo, la fecha elegida para los muestreos y mediciones y sus condiciones particulares, de humedad, de cultivo y de su desarrollo sí que tuvieron una influencia en estas propiedades. Por lo tanto, en casos como este, resulta de mayor importancia la elección de la rotación de cultivos que la propia elección del tipo de laboreo. Evitar la práctica del barbecho y mantener el suelo cubierto y con un cultivo con un buen desarrollo radical parece influir positivamente en la infiltración de agua y en otras propiedades hidráulicas. La elección del sistema de manejo del suelo se debe basar más en otros criterios como en el riesgo de encostramiento, el control de malas hierbas y/o enfermedades.

6.- Referencias

- Azooz, R.H., Arshad, M.A., 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Can. J. Soil Sci.* 76, 143-152.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. ASA-SSSA, Madison (USA), pp. 363-375.
- Bodner, G., Leitner, D., Kaul, H. P., 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant Soil* 380, 133-151.
- Bouwer, H., 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. ASA-SSSA, Madison (USA), pp. 825-844.
- García-Díaz, A, Bienes, R, Sastre B. 2015. Study of Climatic Variations and Its Influence on Erosive Processes in Recent Decades in One Location of Central Spain. *Engineering Geology for Society and Territory*, G. Lollino, A. Manconi, J. Clague, W. Shan, M. Chiarle (eds.). Vol.: 1, Part II, 105-108. Springer International Publishing. New York (USA).
- Green, T.R., Ahuja, L.R., Benjamin, J.G., 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116, 3-27.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Elsevier Science.
- Kay, B.D., VandenBygaart, A.J., 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66, 107-118.
- Kaye, J.P., Quemada, M., 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change: a review. *Agron. Sust. Agric.* 37, 4.
- Kutilek, M., 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.* 79, 175-184.
- Lin, H.S., McInnes, K.J., Wilding, L.P., Hallmark, C.T., 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a wellstructured subsoil. *Trans. ASAE* 39, 131-135.
- Martín-Lammerding, D., Hontoria, C., Tenorio, J.L., Walter, I., 2011. Mediterranean Dryland Farming: Effect of Tillage Practices on Selected Soil Properties. *Agron. J.* 103, 382-389.
- Martín-Lammerding, D., Navas, M., Albarrán, M.M., Tenorio, J.L., Walter, I., 2015. Long term management systems under semiarid conditions: Influence on labile organic matter, β -glucosidase activity and microbial efficiency. *Appl. Soil Ecol.* 96, 296-305.
- Moret, D., Arrúe, J.L., 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Till. Res.* 96, 103-113.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. ASA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 961-1010.
- Peel, M.D., B.L. Finlayson, T.A. McMahon, 2008. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633-1644.
- Richards, L.A., 1947. Pressure-membrane apparatus- construction and use. *J. Agric. Eng.* 28, 451-454.
- Richards, L.A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.* 68, 95-112.
- Scanlan, C. A., 2009. *Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties*, University of Western Australia.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC., USA, p. 372.
- Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.* 99, 4-48.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.