

Estudios en la Zona No Saturada

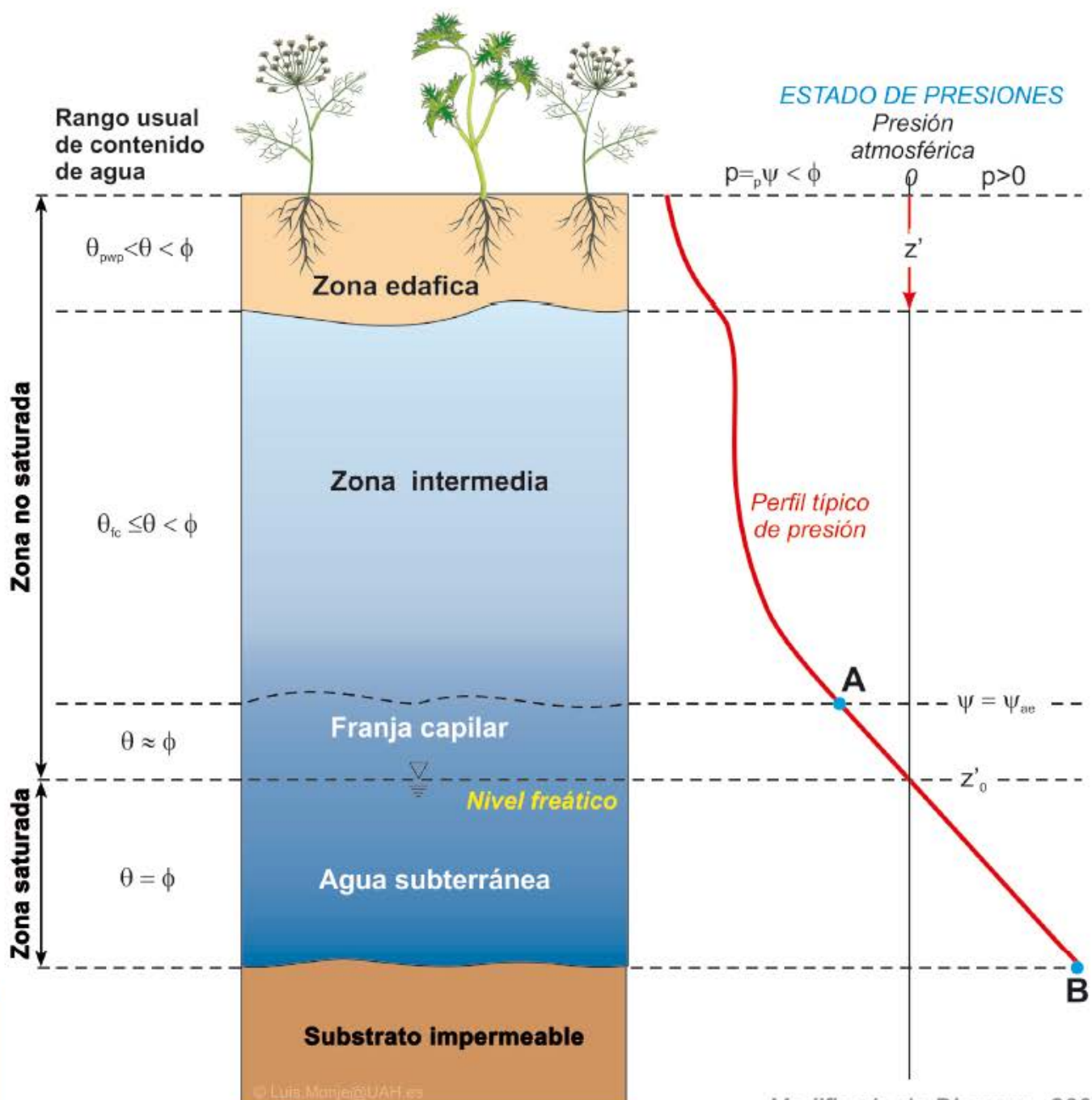
Vol. XII ZNS'15

Alcalá de Henares, 18-20 noviembre 2015

Editores

Silvia Martínez Pérez

Antonio Sastre Merlín



Estudios en la Zona No Saturada. Vol. XII

Editores

Silvia Martínez Pérez
Antonio Sastre Merlín

Revisores científicos de los artículos

Ramón Bienes Allas
Jorge Dafonte Dafonte
Juan Vicente Giráldez
Juan José López
José Martínez Fernández

David Moret Fernández
Rafael Muñoz Carpena
Antonio Paz González
María José Polo
Miguel Quemada
Carlos Regalado

Axel Ritter
Javier Samper Calvete
Susanne Schnabel
Karl Vanderlinden
Eva Vidal

Trabajos presentados en las XII Jornadas de investigación en la Zona No Saturada del Suelo.
Alcalá de Henares, 18-20 de noviembre de 2015

Comité organizador

Antonio Sastre Merlín (UAH) – Coordinador
Silvia Martínez Pérez (UAH) – Secretaría Técnica
Loreto Martínez de Baroja Villalón (UAH)
Ramón Bienes Allas (IMIDRA)
Samuel García Díaz (UAH)
Eugenio Molina Navarro (UAH)
Mario Ballesteros Olza (UAH)

Comité científico

Jorge Dafonte Dafonte (Univ. Santiago de Compostela; Campus de Lugo)
Juan Vicente Giráldez (Univ. Córdoba)
Juan José López (Univ. Pública de Navarra; Pamplona)
José Martínez Fernández (Univ. Salamanca)
David Moret Fernández (Estación experimental de Aula Dei-CSIC)
Rafael Muñoz Carpena (Univ. Florida, USA)
Antonio Paz González (Univ. A Coruña)
María José Polo (Univ. Córdoba)
Miguel Quemada (UPM, Madrid)
Carlos Regalado (ICIA, Tenerife)
Axel Ritter (Univ. La Laguna)
Javier Samper Calvete (U. A Coruña)
Susanne Schnabel (Univ. Extremadura)
Karl Vanderlinden (IFAPA, Junta de Andalucía)
Ramón Bienes Allas (IMIDRA, Comunidad de Madrid)
Eva Vidal (Facultad Ciencias, Univ. La Coruña)



LabFerrer

La reproducción total o parcial de este libro (incluido su diseño), su alquiler, su incorporación a un sistema informático, su transmisión o transformación en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin la autorización previa y por escrito de los titulares del *copyright*, vulnera derechos reservados.

© de los textos: sus autores

© de esta edición: Universidad de Alcalá • Servicio de Publicaciones, 2015
Plaza de San Diego, s/n • 28801, Alcalá de Henares (España).
Página web: www.uah.es

I.S.B.N.: 978-84-16133-91-8

Depósito legal: M-36240-2015

Impresión y encuadernación: Cimapress, S.L.

Impreso en España (Unión Europea)

El contenido de los artículos que componen este libro es de exclusiva responsabilidad de los autores

Prefacio

Los investigadores que de una manera u otra trabajamos sobre ese singular dominio del suelo y subsuelo que denominamos *zona no saturada*, acudimos por duodécima vez a la ya tradicional cita otoñal bienal para exponer, comentar y contrastar las aportaciones que hemos sido capaces de armar desde nuestro anterior cónclave en Lugo. Un total de cuarenta y una aportaciones conforman el presente volumen, que supone el decimosegundo de la colección “*Investigación en la zona no saturada*”, superando en una decena a las que concurrieron a la reunión lucense; teniendo en cuenta las circunstancias económicas reinantes en este bienio, ello permite entrever una moderada perspectiva optimista tras estos duros años de contracción económica de los presupuestos para la investigación científica.

Cabe reseñar que todos los trabajos aquí recogidos han sido sometidos a la revisión de uno o más evaluadores antes de la decisión de su inclusión en el volumen final que el lector tiene en sus manos; en la mayor parte de los casos han sido los miembros del Comité Científico propuestos por el Comité Organizador los que desinteresadamente han realizado esa tarea, por lo que es procedente hacer constar desde estas líneas el más sincero agradecimiento.

No es frecuente que un grupo heterogéneo de investigadores, sólo aglutinados por el denominador común de su interés acerca de los procesos que tienen lugar en aquel dominio del suelo y subsuelo, sin el soporte de una asociación aglutinadora específica, haya sido capaz de mantener el pulso vital durante los veintidós años transcurridos desde la iniciática reunión de Castellón, allá por el algo lejano año de 1993. Ello está, sin duda, en el haber de todos los que nos sentimos miembros de esta inespecífica familia.

Siguiendo parcialmente las directrices de anteriores reuniones y las indicaciones vertidas en las circulares de esta reunión, los trabajos presentados –para ser defendidos ya oralmente, ya en formato póster– se han agrupado en las siguientes áreas temáticas:

- *Caracterización y análisis de la zona no saturada;*
- *Infiltración-retención hídrica en el suelo y/o adsorción de sustancias en el sistema suelo-planta;*
- *Recarga e interacción entre atmósfera, suelo y acuífero;*
- *Contaminación y métodos de remediación;*
- *Investigaciones sobre procesos de transferencia de masa y energía en la zona no saturada, a escala tanto de laboratorio como de campo y/o invernadero;*
- *Modelos descriptivos y predictivos de los procesos que acontecen en la zona no saturada.*

No obstante, cabe señalar un cierto halo de heterogeneidad temática en los trabajos presentados en relación con lo que en sentido estricto se considera “zona no saturada”, que será bueno limar para convocatorias futuras de estas reuniones.

Preciso es agradecer a la Universidad de Alcalá –y particularmente al Decanato y a la Administración-Gerencia de la Facultad de Biología, Ciencias Ambientales y Química, así como a los Servicios Administrativos Centrales, las facilidades administrativas y materiales para materializar esta reunión. Obligado resulta mencionar la profesional labor de Elisa Borsari y Ronda Vázquez Martí en la maquetación y revisión del volumen, y el apoyo prestado por el Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá para la edición del volumen.

Procede mencionar la colaboración prestada por el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDRA) para el desarrollo del recorrido post-congreso, así como a la empresa LAB-Ferrer, que puntualmente colabora con los sucesivos comités organizadores, desde varias ediciones atrás de estas reuniones, asumiendo íntegramente el coste de la participación del ponente invitado. También hay que incluir en las menciones al Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad (Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes) del Ayuntamiento de Madrid, por las facilidades dadas para la visita al Parque Garrigues Walker.

Esperando que tanto esta reunión científica –a la que aplicamos el acrónimo ZNS’15–, como este volumen mismo satisfaga las expectativas en ambos depositadas, sólo queda hacer votos para que la estancia en Alcalá de Henares resulte grata a los participantes y que contribuya a incrementar las relaciones científicas y personales entre éstos.

El Comité Organizador
Alcalá de Henares, noviembre 2015

Índice de trabajos

Área temática I

Caracterización y análisis de la zona no saturada

UN MÉTODO SENCILLO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD DE UN AGREGADO DE SUELO.....	3
<i>D. Moret-Fernández, M.V. López</i>	
COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO MEDIANTE DIFERENTES EQUIPOS DE LABORATORIO.....	7
<i>M. Biel-Maeso, J. Valdes-Abellan, K. Tamoh, C. Corada-Fernández, L. Candela</i>	
DOS MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO A PARTIR DE UN PROCESO DE: (I) HUMECTACIÓN POR CAPILARIDAD MAS EVAPORACIÓN, Y (II) HUMECTACIÓN POR CAPILARIDAD CON MULTITENSIÓN: ANÁLISIS TEÓRICO.....	15
<i>C. Peña-Sancho, T.A. Ghezzehei, B. Latorre y D. Moret-Fernández</i>	
ORIGIN AND EVOLUTION OF SOILS FROM THE ARDENNES MASSIF: EVIDENCE FROM MINERALOGY AND TRACE ELEMENT CONCENTRATIONS.....	21
<i>C. Moragues Quiroga, P. Stille, J. Juilleret, E. Pelt, T. Perrone, A. Aubert, A. Legout, C. Hissler</i>	
EFFECTS OF DIFFERENT TOPSOIL PROPERTIES ON APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY UNDER VARYING SOIL WATER CONTENTS	25
<i>A. Pedrera-Parrilla, E.C. Brevik., E. Van De Vijver, A.J. Espejo, E.V. Taguas, J.V. Giráldez, S. Martos, K. Vanderlinden</i>	
ESTUDIO CON TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EFECTO DEL TRÁFICO DE MAQUINARIA EN UN SUELO AGRÍCOLA	33
<i>A. García-Tomillo, T. de Figueiredo, J. Dafonte Dafonte, A. Almeida, A. Paz-González</i>	
CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS Y EROSIVOS EN UN SISTEMA DE CULTIVO ALOMADO. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	39
<i>G. Guzmán, A.M. Laguna, J.A. Gómez y J.V. Giráldez</i>	

Área temática II

Infiltración/retención hídrica en el suelo y/o adsorción de sustancias en el sistema suelo-planta

USO DE LA HUMEDAD DEL SUELO PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA: ANÁLISIS CON MEDICIONES IN SITU Y TELEDETECCIÓN	49
<i>J. Martínez-Fernández, N. Sánchez, A. González-Zamora, A. Gumuzzio-Such, C.M. Herrero-Jiménez</i>	
RÉGIMEN ANUAL DE FUSIÓN DE LA NIEVE EN EL ÁREA DE SIERRA NEVADA E IMPLICACIONES EN EL BALANCE LOCAL DE AGUA	55
<i>R. Pimentel, M.J. Pérez-Palazón, J. Herrero, M.J. Polo</i>	
RETRIEVING SOIL MOISTURE WITH RADAR IMAGES: REVIEW OF EXPERIENCES. APPLICATIONS IN MOUNTAINOUS AREAS	61
<i>J. M. Perales, C. Notarnicola, M. J. Polo</i>	
WATER RETENTION FROM SATURATION TO OVEN DRYNESS AND DOMINANT SOIL WATER STATES IN A CULTIVATED VERTISOL	69
<i>K. Vanderlinden, Y. Pachepsky, A. Pederera-Parrilla, G. Martinez, A.J. Espejo-Pérez, F. Perea, J.V. Giráldez</i>	

ESTUDIO CON TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EFECTO DEL TRÁFICO DE MAQUINARIA EN UN SUELO AGRÍCOLA

A. García-Tomillo¹, T. de Figueiredo², J. Dafonte Dafonte³, A. Almeida², A. Paz-González¹

¹ Área de Edafología y Química Agrícola, Universidad de A Coruña – Campus Zapateira – CP-15008 A Coruña, España. aitor.garcia.tomillo@udc.es

² Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança (ESA/IPB), Campus de Santa Apolonia, 5301-855 Bragança, Portugal. tomasfig@ipb.pt

³ Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela – Benigno Ledo s/n. CP-27002, Lugo, España

RESUMEN. La compactación es un grave problema cuya incidencia aumenta ya que es difícil de localizar y revertir al tratarse de un fenómeno sub-superficial. La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es un método geofísico no invasivo que se puede usar para identificación de áreas compactadas, espesor de horizontes y clasificación de propiedades físicas del suelo. Este trabajo estudia la relación entre la resistividad eléctrica del suelo y la compactación del mismo. Los datos de TRE se tomaron en un transecto de 4 m en una parcela en barbecho en el Campus de la Universidad de Bragança (Portugal). Se realizaron medidas de TRE antes y después del laboreo y paso del tractor. Se tomaron muestras de suelo (0-0,05; 0,05-0,1 y 0,1-0,2 m de profundidad) antes y después del paso del tractor para estudiar: Humedad, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y porosidad del suelo. Se observó que el efecto del laboreo y paso del tractor afectó de manera más importante en los primeros 0,05 m de suelo. En las zonas correspondientes a las rodadas del tractor la resistividad eléctrica sufrió una reducción del orden de un 40%, la conductividad hidráulica saturada disminuyó un 70% y la densidad aparente aumentó en un 24%.

ABSTRACT. Soil compaction is a serious problem, which is aggravated because it is difficult to locate and reverse, because it is a subsurface phenomenon. The electrical resistivity tomography (ERT) is a non-invasive geophysical method that can be used to identify compacted areas, soil horizon thickness and classification of soil physical properties. This paper studies the relationship between electrical resistivity and soil compaction. ERT data were taken on a transect of 4 m on a fallow plot on the campus of the University of Bragança (Portugal). ERT measurements were performed before and after tillage and tractor passage. Soil samples (0-0.05, 0.05-0.1 and 0.1-0.2 m depth) were taken to study: soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity and soil water content before and after passage of the tractor. It was observed that the effect of tillage and tractor passage affected most important in the first 0.05 m depth. In the wheel track areas electrical resistivity suffered a reduction of about 40%, saturated hydraulic conductivity decreased by 70% and the bulk density increased by 24%.

1.- Introducción

La compactación del suelo es uno de los más graves problemas causados por la agricultura tradicional que afecta a la calidad física del suelo, la compactación ocurre aún en sistema de no laboreo debido al tráfico de maquinaria agrícola pesada (Batey, 2009). La compactación del suelo modifica la disposición espacial, tamaño y forma de la porosidad del suelo. El problema se agrava debido a que es difícil de localizar y revertir, debido a que la compactación es un fenómeno sub-superficial.

La estructura del suelo es la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios entre las mismas. Los espacios de aire entre y dentro los agregados del suelo son los más importantes; distribuyen el aire, el agua y los nutrientes a través del suelo y además son usados por las raíces de las plantas para anclar y sostener el cultivo de forma adecuada. La degradación de la estructura del suelo es una reducción del espacio poroso entre los agregados. El suelo compactado no proporciona espacio adecuado para el almacenamiento o movimiento del aire y el agua del suelo. Además, la continuidad del sistema de macroporos del suelo se pierde o se reduce en sus dimensiones conduciendo a un movimiento lento del agua y a una aireación reducida. La compactación del suelo, debido al colapso o disminución de los espacios de poros, es la causa más común de restricción física para el crecimiento y desarrollo de las raíces provocando pérdida de rendimiento del cultivo que pueden ser de alto coste económico para el agricultor. Las principales causas de la degradación de la estructura del suelo son las fuerzas de las ruedas de la maquinaria y los implementos agrícolas. La compactación del suelo aparece con frecuencia al utilizarse maquinaria que produce surcos compactados por las ruedas en espacios estrechos. A diferencia de otros fenómenos como la erosión y la salinización, la compactación del suelo no muestra evidencias superficiales; es un fenómeno sub-superficial y requiere análisis físicos antes de ser identificadas su extensión, naturaleza y causa. La combinación del alto coste económico el hecho de no ser fácilmente perceptible hacen de la compactación del suelo un gran peligro para la seguridad alimentaria global. Horn y Fleige (2003) desarrollaron un método para la evaluación del efecto de la maquinaria sobre propiedades físicas del suelo por medios convencionales.

La TRE está reconocida como un método geofísico no invasivo para el estudio de la variabilidad espacial y temporal del suelo que ha sido utilizada para estudiar el efecto del laboreo en propiedades físicas del suelo (Rossi *et al.*, 2013; Besson *et al.*, 2013), para describir capas de suelo labrado (Besson *et al.*, 2004), así como para estimar el contenido de agua del suelo (Samouëlian *et al.*, 2005; Seladji *et al.*, 2010; Dafonte *et al.*, 2013) y la conductividad hidráulica saturada del suelo (Farzamian *et al.*, 2015). Según Friedman, (2005), los factores que afectan al valor de RE son porosidad, contenido en agua, estructura, forma de las partículas y orientación, distribución de tamaño de las partículas, capacidad de intercambio catiónico, composición de cationes de la solución del suelo, temperatura,...El paso de la corriente sucede dentro de los poros rellenos de agua y en la superficie de las partículas de arcilla, la RE dependerá en cierta medida de la densidad aparente del suelo y de forma más general de la estructura del suelo (Basso *et al.*, 2010).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de compactación sobre el suelo como consecuencia del laboreo y el paso de maquinaria agrícola utilizando la tomografía eléctrica resistiva en una sub-parcela de ensayo en barbecho; para ello se midió la densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica saturada del suelo.

2.- Material y Métodos

2.1.- Área de Estudio

La parcela de estudio está situada en Bragança (Portugal) en las coordenadas geográficas N 41° 47' 802''W estando dedicada a barbecho. Dentro de la misma se eligió para este trabajo una sub-parcela de 20 m x 4 m. El suelo es un Cambisol Eútrico de rocas metabásicas (IUSS, 2014). Su textura es Franco-Arenosa con un 30,24 % de elementos gruesos (>2 mm).

2.2.- Labores

Se utilizaron dos tipos de tractores: un tractor de 90 CV John Deere 5620 de 4300 kg de peso con una distancia entre ejes de 2,20 m; neumáticos delanteros 340/85 R 24 y traseros 420/85 R 34; y otro tractor de 60 CV Fiat 55-46 de 2260 kg de peso con neumáticos delanteros 6.00-16 y traseros de 12.4/11-32.

En primer lugar se realizó una labor con un arado de vertedera reversible de 12 cuerpos (6 rejas) con un ancho de trabajo de 1,80 m. A continuación se llevó a cabo una labor con el cultivador de 9 brazos plegables de muelle a una profundidad de 0,2 m, siendo el ancho de trabajo de 2,43 m y por último los tractores recorrieron la sub-parcela sin aperos.

2.3.- Muestras de suelo

Las 18 muestras de suelo se tomaron previamente al laboreo y al paso de los tractores el 11 de Febrero de 2015,

sin precipitaciones los días previos al muestreo. A continuación del laboreo y paso de la maquinaria, se recogieron 15 muestras de suelo; el tiempo transcurrido entre la toma de muestras suelo inicial y final fue de aproximadamente una hora. Las muestras de suelo se tomaron en 3 puntos en un transecto perpendicular al paso del tractor, donde también se midió la TRE, y en un segundo transecto a 11 m del anterior dentro de la parcela de estudio. Las muestras fueron tomadas a 3 profundidades: 0-0,05 m; 0,05-0,1 m y 0,1-0,2 m mediante cilindros metálicos de 100 cm³. Se realizó el estudio de la conductividad hidráulica saturada (K_s). Para ello se colocaron los cilindros en el permeámetro de carga constante (carga hidráulica media de 2,4 cm) y circuito cerrado para obtener el valor de K_s (cm/h) de acuerdo a la fórmula (Hillel, 1998):

$$K_s = \frac{V * L}{A * t * h} \quad (1)$$

Siendo:

K_s - Conductividad hidráulica saturada del suelo

V- Volumen de agua obtenido en la bureta

L- Longitud del cilindro.

A- Área de la superficie del cilindro.

t- Tiempo en obtener la medida de volumen V.

h- Diferencia del nivel del agua dentro y fuera del cilindro (en el permeámetro).

La densidad aparente se calculó en función del volumen de los cilindros metálicos utilizados para recoger las muestras. La porosidad del suelo se calculó asumiendo una densidad real de 2,65 g/cm³. Además se recogieron 8 muestras aleatoriamente distribuidas en la parcela para la determinación de la humedad gravimétrica del suelo en el momento de las medidas (TRE y muestreo del suelo) para la profundidad 0-20cm, cuyo valor medio fue de 19,5% ±2,77.

2.4.- Tomografía de Resistividad Eléctrica

Las medidas de TRE se llevaron a cabo en un mismo transecto de la sub-parcela, perpendicularmente al paso de los tractores; realizándose una medición previamente al laboreo y paso de los tractores y otra medición inmediatamente después. Se utilizó un equipo Terrameter SAS 1000 (ABEM), junto con un selector de electrodos ES 10-64; con una separación entre los 40 electrodos metálicos de 0,10 m, y una apertura de alas de 4 m. Los datos de resistividad eléctrica aparente de ambas mediciones fueron invertidos mediante el software RES2DINV para obtener un modelo 2D de los datos de resistividad real. El protocolo elegido para realizar la medida fue el Wenner (Wenner 32SX) debido a que es el más apropiado para el estudio de estructuras horizontales (Loke, 2011; Samouëlian *et al.*, 2005).

En el estudio se usaron para la comparación con las propiedades del suelo el perfil de resistividad eléctrica en la zona de una rodada del tractor de 90 CV y la interrogada adyacente; hasta una profundidad de 0,3 m.

3.- Resultados y discusión

Los resultados de las propiedades del suelo estudiadas antes y después del laboreo y paso del tractor se muestran en la tabla 1. Así mismo en la fig. 1 se presenta su variación relativa antes y después del laboreo y paso de maquinaria. Se puede observar la disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo después del laboreo y paso del tractor en un orden del 84% en la zona de rodada y un 81% en la zona de interrodada; lo que va en consonancia con la disminución de la porosidad total 17% en la zona de rodada y un 12,4% en la zona de interrodada y el aumento de la densidad aparente (17,5% en la zona de rodada y 13% en la de interrodada). La disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo, disminución de la porosidad y aumento de la densidad aparente es diferente en función de la profundidad; la capa superficial de suelo (0-0,05 m) fue la más afectada. A dicha profundidad, los valores medios de conductividad hidráulica saturada del suelo bajan de 797,4 cm/h previo al paso del tractor a 75,42 cm/h en la zona de rodada y a 111,1cm/h en la zona de interrodada; la porosidad decrece de un 55,4% previo al paso de maquinaria a un 44,61% en la zona de rodada y a un 49,1% en la zona de interrodada mientras que los valores medios de densidad aparente se incrementan de 1,18 g/cm³ previo al paso del tractor a 1,47 g/cm³ en la zona de rodada y a 1,35 g/cm³ en la zona de interrodada. Destacar la gran variabilidad de la conductividad hidráulica saturada; reflejada en los elevados de valores de Ks y de los coeficientes de variación (CV=181% previo al paso del tractor, CV=134% en la zona de rodada y CV=40,32% en la zona de interrodada).

Los datos de resistividad eléctrica tras la inversión previamente y posterior al laboreo y paso del tractor se muestran en la fig. 2. Se observa una disminución del valor de la resistividad eléctrica una vez se ha efectuado el laboreo y el paso del tractor sobre el terreno. El valor medio para los datos previos en los 23 primeros cm es de 106,24 $\Omega \cdot m$ (con un mínimo de 17,97 $\Omega \cdot m$ y un máximo de 204,08 $\Omega \cdot m$) y el valor medio de los datos posteriores es de 84,20 $\Omega \cdot m$ (con un mínimo de 19,62 $\Omega \cdot m$ y un máximo de 128,3 $\Omega \cdot m$). De acuerdo con Besson *et al.*, (2004, 2013), en las zonas compactadas se observan claramente que tienen una menor resistividad eléctrica, lo que coincide con los observado. Basso *et al.*, (2010) encontraron valores de resistividad eléctrica obtenida por TRE entre 10-80 $\Omega \cdot m$ en suelo en barbecho. En la fig. 3 se muestra el perfil vertical de la resistividad eléctrica en las zonas de rodada del tractor y en las de interrodada; mostrando en los primeros 0,2 m del suelo una gran disminución en las zonas de rodada mientras que en las de interrodada la reducción no es tan destacable. En la fig. 4 se muestra la variación relativa de la resistividad eléctrica en profundidad, donde se observa una disminución de la resistividad eléctrica un 35% en los primeros 0,05 m del suelo en la zona de rodada, y una reducción de 21% y 22% en las zonas de rodadas en las profundidades 0,05-0,10 m y 0,1-0,2 m respectivamente. Las zonas de interrodada sufren reducciones de entre el 4-5% para las 3 profundidades. Los resultados muestran por lo tanto que la

TRE es una herramienta adecuada para la valoración de la compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria pesada sobre el suelo.

Según Seladji *et al.*, (2010) es recomendable realizar el estudio y monitorización de la compactación del suelo con el suelo seco, debido a que los datos de resistividad son sensibles a incrementos de la densidad para contenidos en humedad bajos, aunque en nuestro caso con un contenido de humedad del 19,5%, sí que se apreció una clara diferencia entre los valores de resistividad eléctrica en el suelo compactado y en el no compactado. Si bien, los valores de resistividad eléctrica tienen una variación relativa mayor en la zona de rodadas respecto a la zona interrodadas, que en el resto de propiedades físicas estudiadas.

Tabla. 1. Comparación de los valores medios ($\pm$ desviación típica) de las propiedades del suelo estudiadas por profundidad para las situaciones previo y posterior al laboreo y paso del tractor obtenidas en la rodada e interrodada.

Prop	Uds.	Prof. (m)	Previo	Posterior	
				Interrodada	Rodada
δ	g/cm ³	0-0,05	1,18a $\pm$ 0,16	1,35ab $\pm$ 0,24	1,47b $\pm$ 0,12
		0,05-0,1	1,29a $\pm$ 0,13	1,43ab $\pm$ 0,12	1,57b $\pm$ 0,04
		0,1-0,2	1,47a $\pm$ 0,28	1,66ab $\pm$ 0,64	1,58b $\pm$ 0,09
N	%	0-0,05	55,4a $\pm$ 6,20	49,1ab $\pm$ 8,9	44,61b $\pm$ 4,4
		0,05-0,1	51,3a $\pm$ 5,03	46,2ab $\pm$ 4,5	40,78b $\pm$ 1,6
		0,1-0,2	44,5a $\pm$ 10,55	37,3ab $\pm$ 1,6	40,26b $\pm$ 0,1
Ks	cm/h	0-0,05	797,4a $\pm$ 1444	111,1ab $\pm$ 45	75,42b $\pm$ 101
		0,05-0,1	364,3a $\pm$ 547	83,7ab $\pm$ 66	192,37b $\pm$ 38
		0,1-0,2	37,8a $\pm$ 39	62,3ab $\pm$ 34	68,57b $\pm$ 63

δ =Densidad aparente, N=porosidad total, Ks =Conductividad hidráulica saturada. No fueron encontradas diferencias significativas entre profundidades para ninguna de las propiedades del suelo en ninguna de las situaciones (previo-posterior, rodada-interrodada) ($p>0,05$).

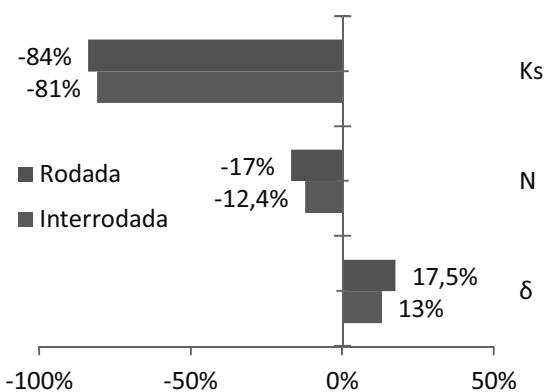


Fig. 1. Variación relativa (%) de la Conductividad hidráulica saturada, Porosidad y Densidad aparente: antes y después del laboreo y paso del tractor. Ks =Conductividad hidráulica saturada, N=porosidad total, δ =Densidad aparente.

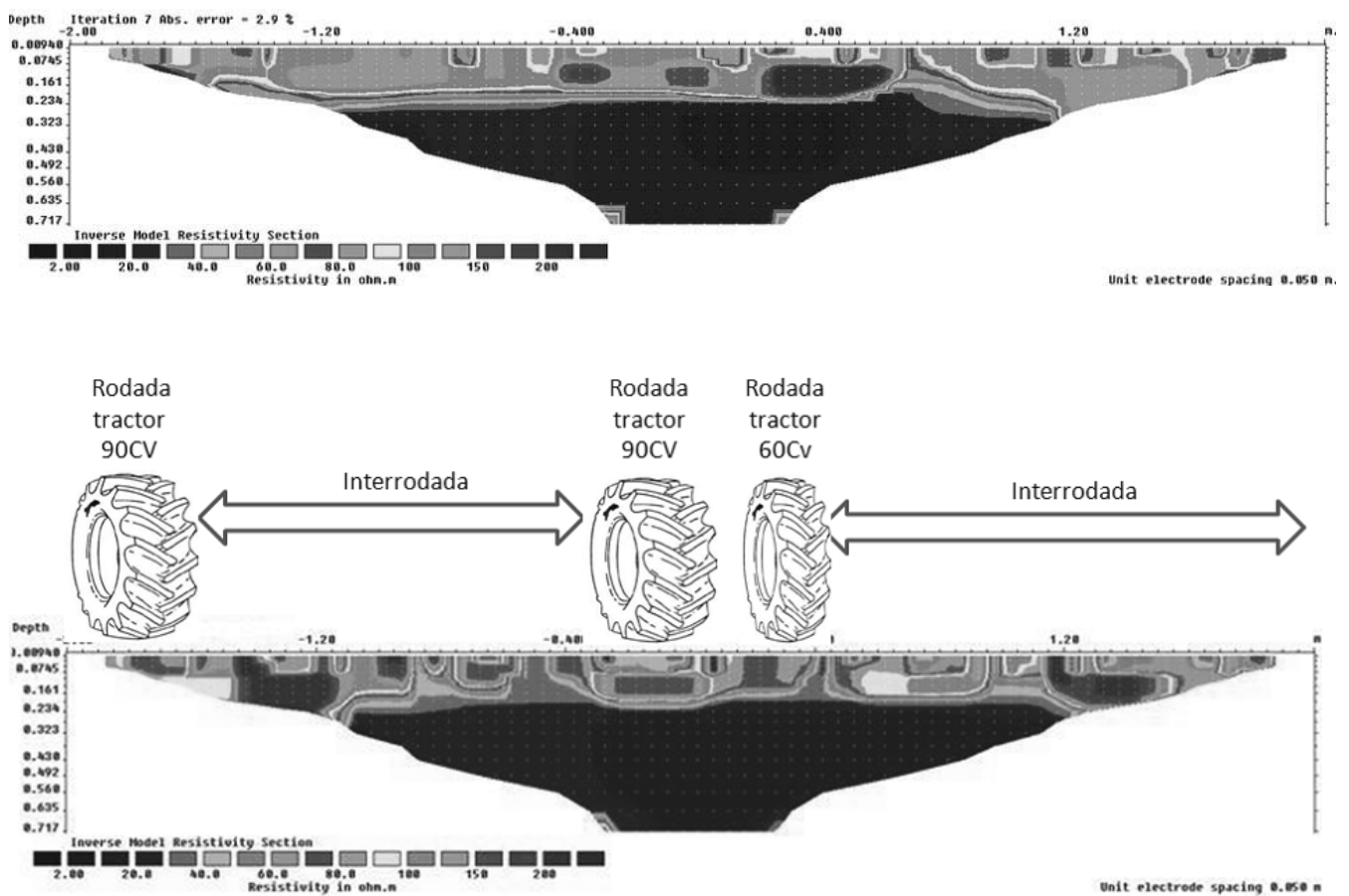


Fig. 2. Perfiles del modelo inverso de resistividad eléctrica obtenidos con el RES2DINV para antes y después del laboreo y paso del tractor.

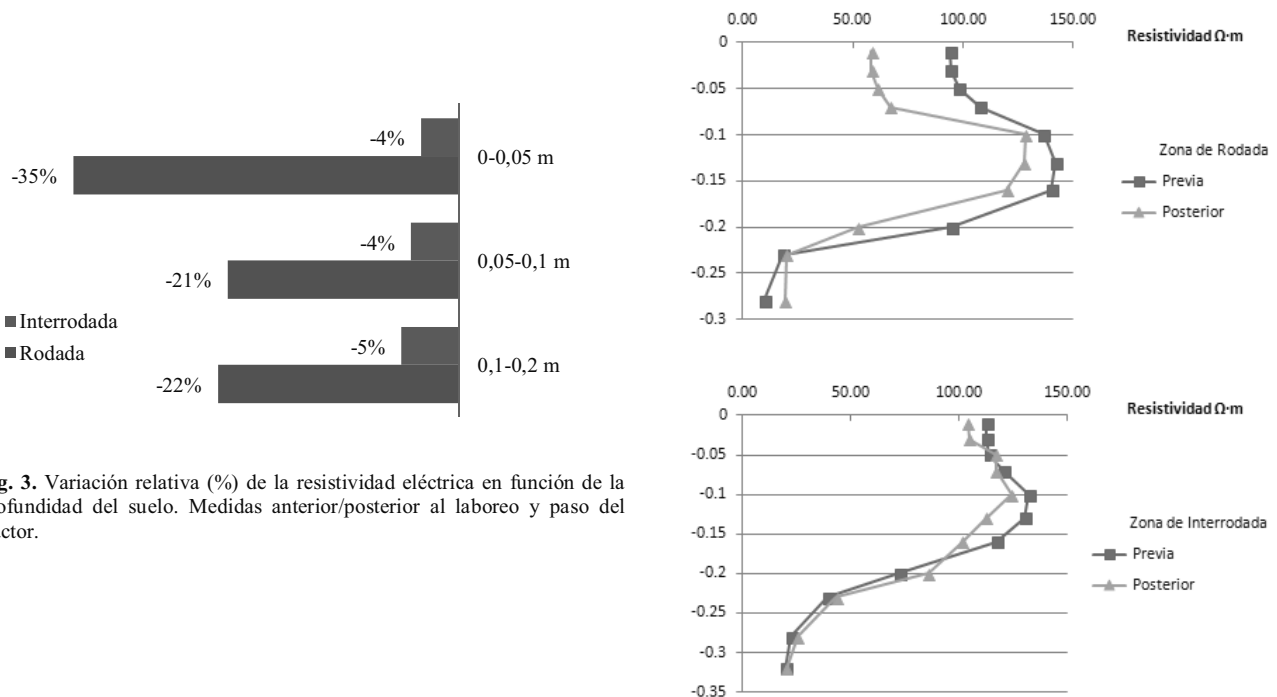


Fig. 3. Variación relativa (%) de la resistividad eléctrica en función de la profundidad del suelo. Medidas anterior/posterior al laboreo y paso del tractor.

Fig. 4. Resistividad ($\Omega \cdot m$) por profundidad (m) en las zonas de rodada e interrodada previa y posterior al laboreo y paso del tractor.

4.- Conclusiones

La TRE ha demostrado su utilidad como herramienta para detectar la compactación provocada por el paso de maquinaria agrícola, ya que ha detectado claramente la compactación provocada en la zona de las rodadas el valor de resistividad eléctrica sufrió una reducción del orden de un 40%, la conductividad hidráulica saturada disminuyó un 70% y la densidad aparente aumentó en un 24%, con respecto a la situación antes del laboreo. Con los resultados obtenidos sería posible la utilización conjunta de medidas de propiedades físicas del suelo y de perfiles de TRE en 2D para caracterizar la variabilidad espacial en profundidad y en superficie de la compactación. Como trabajo futuro sería interesante utilizar la TRE en 3D para caracterizar mejor la variación de la resistividad eléctrica y con ello la compactación.

Agradecimientos. Este Trabajo fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto CGL2013-47814-C2.

5.- Bibliografía

- Basso B., M. Amato, G. Bitella, R. Rossi, A. Kravchenko, L. Sartori, L. M. Carvahlo y J. Gomes. 2010. Two-Dimensional Spatial and Temporal Variation of Soil Physical Properties in Tillage Systems Using Electrical Resistivity Tomography. *Agron. J.*, 102(2), 440-449.
- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use Manage.* 25, 335-345.
- Besson, A., Cousin, I., Samouëlian, A., Boizard, H., Richard, G. 2004. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil Till Res.* 79, 239-249.
- Besson, A., M. Séger, G. Giot y I. Cousin. 2013. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, 204-205, 130-139.
- Dafonte, D, J.R. Raposo, M. Valcárcel, M. Fandiño, E.M. Martínez, B.J. Rey y J.J. Cancela. 2013. Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego. pp. 57-62. En: J. Dafonte Dafonte, J.J. Cancela Barrio, A. López Fabal, N. López López, E.M. Martínez Pérez y M. Valcárcel Armesto (eds.). Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. XI - ZNS'13. Universidade de Santiago de Compostela.
- Farzamian, M., F.A. Monteiro Santos y M.A. Khalil. 2015. Application of EM38 and ERT methods in estimation of saturated hydraulic conductivity in unsaturated soil. *J. Appl Geophys.* 112, 175-189.
- Friedman S. P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Comput. Electron. Agr.* 46, 45-70.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.
- Horn, R., H. Fleige. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Till Res.* 73, 89-99.
- IUSS Working Group WRB. 2014. *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources reports No. 106*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Loke, M.H. 2011. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Disponible en: www.geoelectrical.com.
- Rossi, R., M. Amato, G. Bitella y R. Bochicchio. 2013. Electrical resistivity tomography to delineate greenhouse soil variability. *Int. Agrophys.* 13 (27), 211-218.
- Samouëlian, A.; I. Cousin; A. Tabbagh; A. Bruand y G. Richard. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res.* 83, 173-193.
- Seladjji, S., P. Cosenza, A. Tabbagh, A., J. Ranger y G. Richard. 2010. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation, *Eur. J. Soil Sci.*, 61(6), 1365-2389.