

VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN EN UN LOTE BAJO SIEMBRA DIRECTA

MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI^{1*}; TRINIDAD REDDEL BIANCO¹

Recibido: 02/06/2020

Recibido con revisiones: 05/03/2021

Aceptado: 05/03/2021

RESUMEN

La compactación de los suelos representa un problema productivo y ambiental. Este proceso puede variar en intensidad de acuerdo a la profundidad y posición de los suelos en el paisaje, como también a partir del efecto de diferentes prácticas agrícolas. El objetivo del presente trabajo fue estudiar durante una secuencia de cultivos soja-trigo/soja bajo siembra directa, la variación temporal y espacial de la resistencia a la penetración (RP), en un lote con relieve ondulado del norte de Bs. As. Se trabajó sobre un Argiudol en un lote ondulado con presencia de suelos erosionados y con más de veinte años bajo siembra directa. Se midió la RP y la humedad gravimétrica cada 5 cm hasta los 20 cm de profundidad, en tres posiciones del paisaje y en cinco momentos durante un año. Para poder comparar los resultados de RP entre fechas y posiciones del paisaje, estos se corrigieron a un mismo valor de humedad de referencia (RP_{corr}). Los resultados mostraron que aún con una humedad del suelo cercana a capacidad de campo, habría restricciones para el normal crecimiento de las raíces a partir de los 10-15 cm de profundidad. Las variaciones temporales de RP_{corr} dependieron de la posición en el paisaje, sin haber evidencias del efecto del tránsito de la maquinaria sobre dichos cambios. La erosión de los suelos no incidió sobre los resultados de RP_{corr} , siendo el pie de loma la posición en el paisaje que presentó en mayor número de oportunidades superiores valores para esta propiedad.

Palabras clave: posición en el paisaje, erosión, prácticas de manejo.

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF PENETRATION RESISTENCE IN A PLOT UNDER NO TILLAGE

ABSTRACT

Soil compaction represents a productive and environmental problem. This process can vary in intensity according to soil depth, soil landscape position and management practices. The objective of the present work was to study, during a soybean-wheat/soybean crop sequence under no tillage, the temporal and spatial penetration resistance (RP) variation, in a plot with undulate relief located in the north of Bs. As. We worked on an Argiudol in an undulate plot with the presence of eroded soils and with more than twenty years under no tillage. The RP and gravimetric soil water content was measured every 5 cm of depth and up to 20 cm, in three landscape positions and at five moments during a year. In order to compare the RP results between dates and landscape positions, the results of this variable were corrected to the same soil water content reference value (RP_{corr}). The results showed that even with soil moisture content close to field capacity, soils would present restrictions to root growth from 10-15 cm deep. The temporal variations of RP_{corr} depended on the soil position in the landscape. These changes did not result from the effect of agricultural machinery traffic. Soil erosion did not affect the RP_{corr} results, being the footslope the landscape position that generally presented higher values in this property.

¹ Facultad de Agronomía (UBA)

* Autor de contacto: castigli@agro.uba.ar



Keywords: landscape position, erosion, management practices.

INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos es un proceso que restringe el crecimiento de las raíces y la emergencia de los cultivos (Bengough *et al.*, 2011), con consecuencias productivas y ambientales negativas (Whalley *et al.*, 2008; Alaoui, 2015). Para su monitoreo se utilizan comúnmente penetrómetros, mediante los cuales se determina la resistencia a la penetración (RP) de los suelos (Moraes *et al.*, 2014).

El contenido de agua edáfica incide sobre los resultados de RP, habiéndose propuesto la aplicación de correcciones para llevar los valores de esta propiedad a iguales contenidos hídricos y poder contrastar los mismos entre distintas situaciones (Vaz *et al.*, 2011).

Jung *et al.* (2010) mencionaron que las propiedades de los suelos con horizontes argílicos pueden variar en función de su posición en el paisaje y según el grado de erosión o sedimentación sufrido. Estos autores determinaron diferencias en la RP en suelos con mayor grado de erosión ubicados en la pendiente, respecto a los dispuestos en la loma y pie de loma. Por su parte, esta propiedad puede sufrir cambios según las prácticas agrícolas implementadas durante el año (Fernández *et al.*, 2015)

1^{ra} en R3 con cultivo antecesor maíz); (2) mayo de 2019 (post-cosecha de soja/barbecho); (3) agosto de 2019 (trigo en macollaje); (4) diciembre de 2019 (post-siembra de soja) y (5)

En el norte de la provincia de Buenos Aires se encuentran Argiudoles dispuestos sobre un relieve ondulado, los que presentan distinto grado de erosión y sedimentación (Bujan *et al.*, 2003), incidiendo dichos procesos en las propiedades edáficas (Maggi *et al.*, 2016; Castiglioni & Reddel Bianco, 2020). El objetivo del presente trabajo fue analizar durante un año y en un lote con relieve ondulado del norte de la Provincia de Buenos Aires, la variación temporal y espacial de la resistencia a la penetración, en el transcurso de una secuencia de cultivos soja-trigo/soja bajo siembra directa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en un lote de 70 ha con 20 años bajo siembra directa (33°47'43.70"S 59°55'6.30"O), correspondiente a la localidad de San Pedro (Buenos Aires). El clima regional es templado - húmedo, con una precipitación anual promedio de 1073 mm para el periodo 1965-2019 (INTA, 2019). La serie de suelo presente es Ramallo (Argiudol vértico, franco, illítico, térmico) y sus fases por erosión hídrica (Buján *et al.*, 2003). El mismo presenta en el horizonte superficial un contenido de agua a capacidad de campo de 0,27 gr gr⁻¹, siendo el mismo en marchitez permanente de 0,13 gr gr⁻¹ (Castiglioni *et al.*, 2010)

Las mediciones de RP se realizaron en las siguientes fechas: (1) febrero de 2019 (soja de principios de marzo de 2020 (soja de 2^{da} en R₁), en intervalos de 5 cm hasta los 20 cm de profundidad. Se utilizó un penetrómetro de golpe que tiene un cono de 30°, una pesa de 2 kg, un



recorrido de la pesa de 0,65 m y un diámetro de 1,9 cm. Los resultados se transformaron a MPa de acuerdo con las características del equipo. Dentro del lote se delimitó un área de 33 ha que abarcó tres posiciones en el paisaje distintas: ladera alta (LA), ladera media y baja (LB) y pie de loma (PL). En cada uno de dichos sectores se marcaron tres sitios distanciados entre sí a 200 m, realizando en cada uno cuatro mediciones de RP. En todos los sitios, fechas y estratos analizados se tomaron muestras de suelo para establecer su humedad gravimétrica (Hum) (Gardner, 1986). También se determinó en cada lugar de muestreo, la textura por el método del hidrómetro (Gee & Or, 2002).

Teniendo en cuenta distintas ecuaciones (Vaz *et al.*, 2011), se determinó la función que mejor representaba la relación Hum-RP para cada capa de suelo, seleccionando aquella que obtuvo mayor R^2 . Luego se corrigieron los resultados de RP (RP_{corr}) para una humedad gravimétrica del suelo de $0,26 \text{ gr gr}^{-1}$, que representa un valor cercano al de capacidad de campo.

Se estudió mediante el análisis de varianza los cambios de RP_{corr} entre fechas de muestreo y entre posiciones del paisaje para una misma profundidad. Dada la falta de normalidad en los resultados, a pesar de las distintas transformaciones que se hicieron sobre los mismos, se utilizó un test de comparación de medias no paramétrico (Kruskal & Wallis, 1952), el que no asume normalidad en la distribución de los datos (Di Rienzo *et al.*, 2009). Estos estudios se realizaron utilizando el software InfoStat versión 2015 (Di Rienzo *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las precipitaciones del período estudiado fueron algo menores respecto al promedio histórico, siendo 130 mm inferiores en otoño-invierno de 2019 y habiendo llovido 80 mm menos durante la primavera-verano de 2019/20. Por lo tanto, durante la cosecha de la soja y siembra del trigo, el suelo presentó una condición de humedad inferior a lo normal para esta época del año.

En **Tabla 1** se detallan las funciones que obtuvieron el mejor ajuste entre los valores de RP y Hum para cada profundidad. La misma fue lineal en superficie y con menor ajuste respecto a los restantes estratos, en los cuales la función potencial fue la que mejor se adaptó a la relación Hum-RP.

Cerana *et al.* (2005) al utilizar una ecuación potencial negativa para reproducir la relación Hum-RP en Vertisoles de Entre Ríos, también determinaron un menor grado de ajuste de la misma en superficie respecto a lo ocurrido a mayor profundidad. Por su parte, Alvarez *et al.* (2009) y Fernandez *et al.* (2015) comprobaron en los estratos superficiales de distintos Argiudoles del norte de la Provincia de Buenos Aires, una relación lineal entre ambos parámetros, mientras que Wilson *et al.* (2006) y Wilson *et al.* (2013) trabajando con Argiudoles y Vertisoles de Entre Ríos, ajustaron funciones potenciales con un R^2 por encima de 0,77.

En la **Figura 1** se observan los resultados de la incidencia de la posición en el paisaje y de la fecha de muestreo sobre RP_{corr} para las cuatro profundidades.

En los primeros 5 cm de suelo no se superó el valor de 2 MPa, considerado como límite para el normal desarrollo de las raíces (Bengough *et al.*, 2011), obteniéndose para dicho estrato un



promedio de RP_{corr} de 0,77 MPa. Entre 5 y 10 cm, los resultados de RP_{corr} de los suelos de las tres posiciones del paisaje en la fecha 1 y los de PL en las fechas 3 y 5, estuvieron por encima del umbral, con un promedio general de 1,74 MPa. Todos los valores de RP_{corr} (10 a 15 cm) correspondientes a PL y los de la fecha 1 superaron los 2 MPa, aunque en el resto de las situaciones se observaron resultados cercanos a dicho valor, siendo el promedio de 2,58 MPa. En todas las fechas y posiciones del paisaje, RP_{corr} de 15 a 20 cm estuvo por encima de 2 MPa, con un promedio de 3,22 MPa.

Tabla 1: Parámetros de los modelos de regresión lineal ($PR=a+(-b*hum)$) y potencial ($PR=(a*(hum)^{-b})$) y su grado de ajuste para la relación Hum-RP de cada profundidad analizada.

Table 1. Linear ($PR=a+(-b*hum)$) and potential ($PR=(a*(hum)^{-b})$) regression models parameters and their degree of adjustment for the Hum-RP relationship of each analyzed depth.

Profundidad (cm)	Modelo	a	b	R ²
0 a 5	lineal	1,17	-1,79	0,31
5 a 10	potencial	0,0584	-2,365	0,70
10 a 15	potencial	0,0168	-3,62	0,75
15 a 20	potencial	0,0378	-3,233	0,81

a y b parámetros ajustados de los modelos lineal y potencial.
a and b fitted parameters of linear and potential models

Estos resultados muestran que luego de 20 años con siembra directa y bajo condiciones de humedad de suelo cercanas a capacidad de campo, el desarrollo de las raíces se vería restringido en PL a partir de los 10 cm, mostrando el resto de las posiciones un comportamiento similar desde los 15 cm.

La posición en el paisaje y la profundidad del

suelo fueron factores que incidieron en la variación temporal de esta propiedad, ya que LA no presentó a ninguna profundidad cambios significativos de RP_{corr} en el tiempo, en LB se observaron transformaciones en los primeros tres estratos de suelo, mientras que PL mostró modificaciones en esta propiedad solo a dos profundidades (5 a 10 cm y 15 a 20 cm). El estrato superficial fue el que mayores cambios temporales presentó en LB, siendo el momento posterior a la siembra de la soja de 2^{da} (fecha 4) el de menor RP_{corr} , mostrando valores superiores cuando la soja de 1^{ra} se encontraba en R₃ (fecha 1). En esa misma posición del paisaje, entre los 5 a 10 cm y 10 a 15 cm se observó un comportamiento temporal similar, con una RP_{corr} menor durante el barbecho posterior a la cosecha de la soja de 1^{ra} (fecha 2), siendo esta propiedad en ambos estratos superior en las fechas 1 y 3 (soja de 1ra. en R₃ y trigo en macollaje), aunque para la profundidad de 10 a 15 cm, la fecha 5 también presentó los valores más altos. En PL (5 a 10 cm), las fechas 3 y 5 (trigo en macollaje y soja de 2^{da} en R₁) fueron los momentos de mayor RP_{corr} , siendo sus resultados inferiores en fecha 4 (posterior a la siembra de la soja de 2^{da}). En dicha posición y de 15 a 20 cm, se comprobó en el período inicial (fechas 1 y 2) los menores resultados de RP_{corr} , los que se incrementaron hasta llegar a marzo de 2020 con los valores superiores para dicha profundidad.

A pesar de este distinto comportamiento temporal de RP_{corr} en función de la posición en el paisaje y de la profundidad, se puede establecer que durante el barbecho (fecha 2) o inmediatamente después de la siembra (fecha 4), fueron los momentos que en general RP_{corr}



presentó los resultados más bajos, respecto a cuando los cultivos estaban en un período de mayor desarrollo (fechas 1, 3 o 5). Según estos resultados, no hubo durante el año estudiado una evidencia del efecto del tránsito de la

maquinaria agrícola sobre los cambios de corto plazo en la densificación del suelo, sino que estos estuvieron

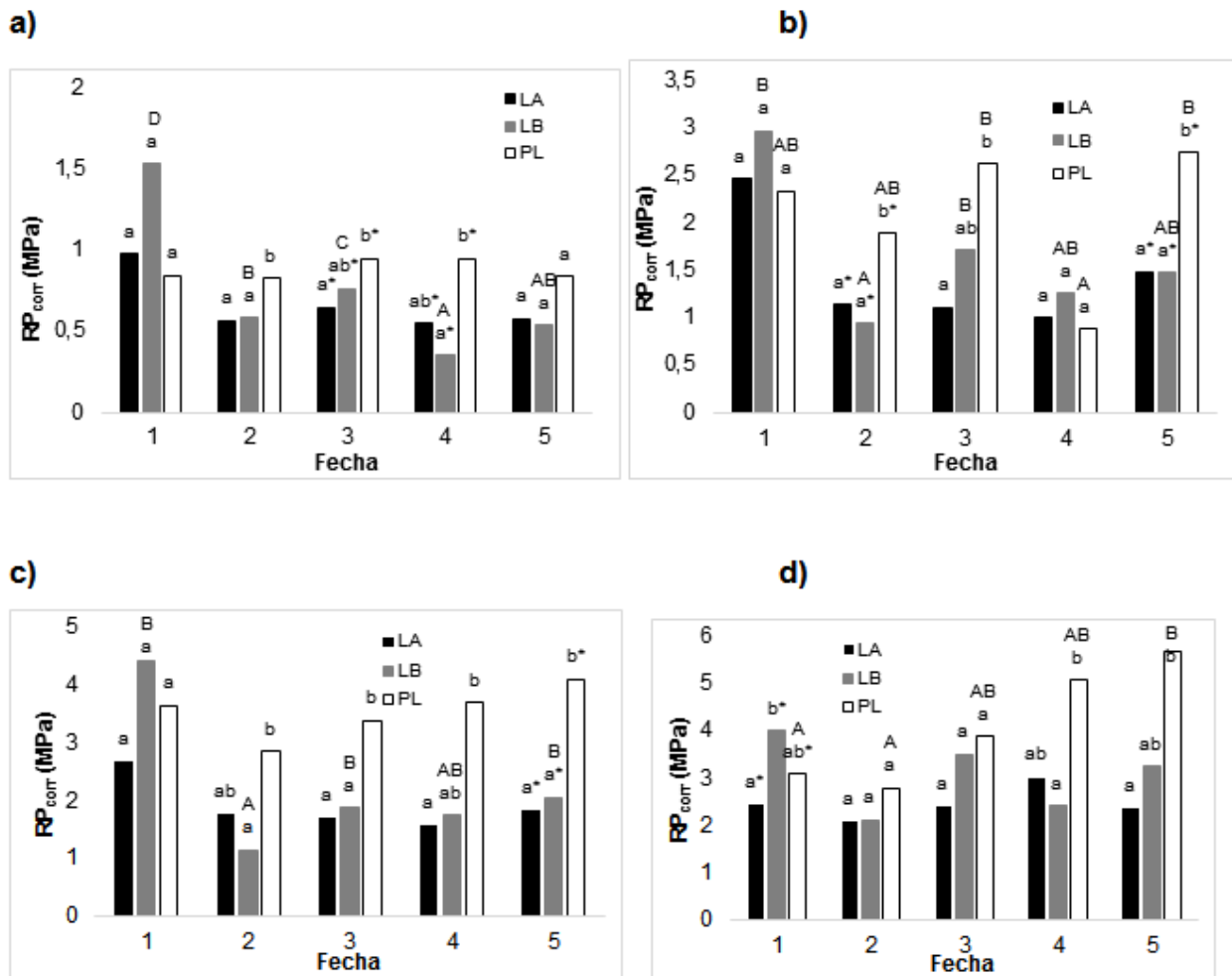


Figura 1: RP_{corr} correspondiente a las distintas fechas y posiciones del paisaje para cada profundidad (a: 0-5 cm; b: 5-10 cm; c: 10-15 cm; d: 15-20 cm).

Figure 1: RP_{corr} of the different dates and landscape positions for each depth (a: 0-5 cm; b: 5-10 cm; c: 10-15 cm; d: 15-20 cm).

LA: ladera alta; LB: ladera media y baja; PL: pie de loma. Letras minúsculas distintas para una misma fecha: diferencias significativas ($p < 0,05$) entre posiciones del paisaje para cada profundidad; *: diferencias significativas ($p < 0,10$) entre posiciones del paisaje. Letras mayúsculas distintas para una misma posición del paisaje: diferencias estadísticas significativas entre fechas para una misma profundidad.

LA: high slope; LB: medium and low slope; PL: footslope. Different lowercase letters for the same date: significant differences ($p < 0,05$) between landscape positions for each Depth; *: significant differences ($p < 0.10$) between landscape positions. Different capital letters for the same landscape position: significant differences between dates for the same depth.



más asociados a la dinámica del crecimiento y descomposición de raíces y su efecto sobre la obturación y liberación de los poros del suelo.

Fernandez *et al.* (2015) no observaron efectos de los cultivos sobre la RP en un Argiudol del norte de Buenos Aires, al mismo tiempo que evaluaron un aumento en esta propiedad luego de la cosecha. Wilson *et al.* (2010) también determinaron efectos de la maquinaria agrícola sobre la RP entre distintas sucesiones de cultivo, comprobando un mayor valor para esta propiedad en aquellas secuencias con un mayor número de cultivos por año.

Las diferencias en RP_{corr} entre posiciones del paisaje dependieron del momento de muestreo y de la profundidad (Figura 1), siendo PL el sector del lote que más frecuentemente mostro un valor superior, obteniendo LA y LB resultados menores o intermedios según la fecha y profundidad consideradas.

Los suelos ubicados en PL presentan menor contenido de arena y mayor porcentaje de arcilla respecto a las restantes posiciones del paisaje (**Tabla 2**). En este sentido, Vaz *et al.* (2011) mencionaron que con altos porcentajes de humedad, la RP crece con el incremento de arcilla, al verse favorecido el proceso de adhesión suelo-metal, mientras que con el suelo más seco se intensifican las fuerzas de fricción suelo-metal al aumentar la proporción de arcilla. Sin embargo, en el presente trabajo no se comprobaron coeficientes de correlación significativos entre la RP_{corr} de cada profundidad con la distribución de partículas de cada capa de suelo. Contrariamente a los resultados determinados en el presente trabajo, Gabioud *et al.* (2012) mostraron mayores valores de RP en los sectores más altos del lote analizado, mien-

tras que en las posiciones más bajas estos fueron menores.

Jung *et al.* (2010) determinaron en suelos que presentaban un horizonte argílico fuertemente textural, mayor RP en aquellos erosionados y ubicados en la ladera, respecto a los encontrados en la loma y pie de loma. Estos autores relacionaron dicho comportamiento con la reducción de la profundidad del horizonte argílico en los suelos erosionados, lo que implica un más rápido y mayor grado de saturación de los estratos superficiales de estos suelos, viéndose favorecido por lo tanto el proceso de compactación superficial ante el tránsito de la maquinaria agrícola.

Tabla 2: Distribución de partículas de los suelos en las distintas posiciones del paisaje.

Table 2: Particle size distribution in the different soil landscape positions.

Posición	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)
LA	11 b	28 a	61 a
LB	13 b	27 a	60 a
PL	7 a	33 b	60 a

LA: ladera alta; LB: ladera media y baja; PL: pie de loma. Letras distintas para un mismo tamaño de partícula: diferencias significativas entre posiciones del paisaje.

LA: high slope; LB: medium and low slope; PL: footslope. Different letters for the same particle size: significant differences between landscape positions.

En la ladera del lote bajo estudio, Castiglioni & Reddel Bianco (2020) determinaron una alta proporción de suelos con erosión moderada y moderada a severa, lo cual contrariamente a lo manifestado por Jung *et al.* (2010), no incidió sobre los resultados de RP_{corr} observados. PL es



un sector del paisaje receptor de los excesos hídricos provenientes de los ambientes ubicados a mayor altura, lo que aparte de generar capas de sedimentos sobre los suelos dispuestos en dicho sector como consecuencia del arrastre de partículas, estos se mantienen húmedos por un lapso de tiempo mayor, lo cual los hace más susceptibles al proceso de compactación ante el tránsito de la maquinaria agrícola.

CONCLUSIONES

Luego de 20 años bajo siembra directa, se observó que aún con contenidos hídricos cercanos a capacidad de campo, los suelos bajo estudio presentarían restricciones para el desarrollo radicular a partir de los 10-15 cm de profundidad, no existiendo evidencias durante el año analizado de la existencia de cambios temporales en los resultados de RP_{corr} asociados al tránsito de la maquinaria agrícola. A su vez, la posición en el paisaje influyó sobre las variaciones temporales de esta propiedad, siendo el pie de loma el sector del lote que más frecuentemente presentó valores superiores de RP_{corr} respecto a los determinados en los suelos de la ladera, lo que estaría vinculado con la permanencia durante más tiempo de un mayor contenido de agua en los suelos presentes en dicho sector del paisaje.

AGRADECIMIENTOS: El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto UBACyT N° 20020170100460BA

BIBLIOGRAFÍA

Alaoui, A. 2015. Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow. *J. Hydrol.* 525: 536–546. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.016>.

Álvarez, CR; MA Taboada; F Gutierrez Boem; A Bono; PL

- Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1242–1250. doi:10.2136/sssaj2008.0246
- Bengough, AG; BM McKenzie; PD Hallett & TA Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exper. Bot.* 62: 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>.
- Bujan, A; OJ Santanatoglia; CI Chagas; M Massobrio; M Castiglioni; M Yañez; H Ciallella & J Fernandez. 2003. Soil erosion evaluation in a small basin through the use of ^{137}Cs technique. *Soil Till. Res.* 69(1-2):127-137.
- Castiglioni, MG; D Mazzoni; C Chagas; E Palacín; O Santanatoglia & M Massobrio. 2010. Distribución de poros en una ladera de la pampa ondulada cultivada con siembra directa. *Ciencia del Suelo.* 28 (2): 243-248.
- Castiglioni, MG & T Reddel Bianco. 2020. Erosión y sedimentación en un lote ondulado bajo siembra directa: su efecto sobre algunas propiedades edáficas superficiales. *Revista Científica Agropecuaria.* En prensa.
- Cerana, J; M Wilson; O Pozzolo; JJ De Battista; S Rivarola & E Díaz. 2005. Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un vertisol. En: *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII Samper Calvete, FJ & A Paz González (Eds).*
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; LA Gonzalez; EM Tablada; MP Díaz; CW Robledo & MG Balzarini. 2009. *Estadística para las ciencias agropecuarias.* 7ma ed. 372 pp.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2015. *InfoStat versión 2015.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fernández, PL; CR Alvarez & MA Taboada. 2015. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop-livestock systems of Argentina. *Soil Till. Res.* 153: 86–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.05.008>
- Gabioud, EA; MG Wilson; S Albarenque; A Kemerer; R Melchiori; MC Sasal; C Pioto. 2012. Variabilidad espacial de la RMP y la DAP de un Molisol en siembra directa y su relación con el rendimiento de soja. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del



- Plata.
- Gardner, WH. 1986. Water content. In: A Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Series Agronomy. ASA, Inc., SSSA, Inc. publisher. Madison, WI, USA. p. 493-544.
- Gee, GW & D Or. 2002. Particle-size análisis. In: JH Dane & GC Topp (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America. Inc. Madison, Wisconsin, USA. p 255-293.
- INTA. 2019. Estación Experimental INTA San Pedro. Reportes Meteorológicos. Series de lluvia 1965-2019.
- Jung, KY; NR Kitchen; KA Sudduth; KS Lee & SO Chung. 2010. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. Soil Till. Res. 107: 1–10. doi:10.1016/j.still.2009.12.007
- Kruskal, WH & WA Wallis. 1952. Use of ranks on one-criterion variance analysis. J Am. Stat. Assoc. 47: 583-621.
- Maggi, AE; F Behrends Kraemer; RM Introcaso & D Thompson. 2016. Caracterización física y química de un Argiudol vértico de la Pampa Ondulada con erosión hídrica en el surco y entresurco. Ciencia del Suelo 34 (1):113-126.
- Moraes, MT; VR Da Silva; AL Zwirtes & R Carlesso. 2014. Use of penetrometers in agriculture: A review. Eng. Agríc. 34 (1): 179-193.
- Vaz, CMP; JM Manieri; IC de María & M Tuller. 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. Geoderma. 166:92-101. doi:10.1016/j.geoderma.2011.07.016
- Whalley, WR; CW Watts; AS Gregory; SJ Mooney; LJ Clark & AP Whitmore. 2008. The effect of soil strength on yield of wheat. Plant Soil 306, 237–247. doi:10.1016/j.geoderma.2006.08.029
- Wilson, M; J Oszust; MC Sasal & A Paz González. 2010. Variación espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con estados estructurales del suelo bajo distintas secuencias de cultivos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Santa Fe, Argentina. 31 de mayo al 4 de junio.
- Wilson, M; O Paparotti; A Paz González & E Díaz Ucha. 2006. Ecuaciones de ajuste entre la resistencia a la penetración y el contenido hídrico en un lote en siembra directa. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta.
- Wilson, MG; MC Sasal; OP Caviglia. 2013. Critical bulk density for a Mollisol and Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. Geoderma 192: 354-361.

