

COMUNICACIÓN

Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística

Characterization of the degree of soil compaction in a field under no till using geostatistical tools

Caracterização do estado de compactação de um solo sob semeadura direta, utilizando ferramentas de geostatística

Javier Alejandro Grosso¹, Juan Manuel Ressia², Carlos Vicente Bongiorno², Gustavo Oscar Mendivil²

¹ Facultad de Agronomía de Azul. Universidad Nacional del Centro (UNICEN)

² Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
grossojavier52@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.35305/agro34.221>

Recibido: 27/02/2019 Aceptado: 28/05/2019

Resumen

Caracterizar el grado de compactación de los suelos a partir del análisis de variables como densidad aparente y resistencia a la penetración permite detectar condiciones que podrían estar afectando el crecimiento de los cultivos. La geoestadística es una herramienta que ayuda a la interpretación de los datos obtenidos para ambas variables, utilizando modelos con los cuales se pueden realizar interpolaciones y confeccionar mapas zonificados a partir de puntos muestreados a campo. El objetivo del trabajo fue validar una metodología para identificar y delimitar zonas de diferente nivel de compactación del suelo en un lote agrícola, como herramienta para realizar un manejo diferencial del mismo. El lote bajo estudio se encuentra ubicado en el centro de la provincia de Buenos Aires y está destinado a agricultura continua bajo siembra directa. Las variables muestreadas para la caracterización fueron: resistencia a la penetración y densidad aparente, hasta una profundidad de 450 mm. Los mapas obtenidos por interpolación a través del método Kriging, muestran distintos estados de compactación del lote en estudio, con valores de resistencia a la penetración cercanos a 1,5 MPa y superiores en zonas de cabeceras, a partir de los 100 mm de profundidad. Por otra parte, a la misma profundidad, los valores de densidad aparente son superiores a 1,20 g cm⁻³, alcanzando valores máximos de 1,41 g cm⁻³, entre los 300-450 mm de profundidad. Ambas variables describen un riesgo por compactación para el crecimiento normal de las raíces, destacándose en los mapas de resistencia a la penetración zonas de cabeceras, fundamentalmente afectadas por el exceso de tráfico. La metodología utilizada permitió identificar zonas del lote con posible respuesta de los cultivos a la descompactación mecánica, brindando la posibilidad de realizar una labor zonificada.

Palabras clave: densidad; kriging; mapas

Abstract

The characterization of the degree of soil compaction by analyzing bulk density and penetration resistance allows detecting conditions that can affect crop growth. Geostatistics provides tools for data interpretation for both variables using models which can be interpolated to build zoned maps based on points sampled from the field. The aim of this work was to validate a methodology to identify and delimit zones with different levels of soil compaction, in order to perform differential soil management strategies. The field studied is under continuous no-till agriculture located in the county of Azul, province of Buenos Aires. Variables sampled for the characterization were penetration resistance and bulk density up to a depth of 450 mm. The maps obtained by interpolation, using the Kriging method, showed different states of soil compaction in the field studied, with penetration resistance values close to 1.5 MPa and higher in headland

zones, starting at 100 mm depth. On the other hand, at the same depth, bulk density values were higher than 1.20 g cm⁻³, reaching maximum values of 1.41 g cm⁻³ between 300-450 mm depth. Both variables describe a compaction risk for normal growth of roots, with headlands standing out in penetration resistance maps as the most affected zones due to excessive traffic. The methodology allowed identifying areas with a possible response of crops to mechanical field decompaction, thus offering the possibility of developing differential management strategies by zone.

Keywords: density; kriging; maps

Resumo

Caracterizar o grau de compactação dos solos a partir da análise de variáveis como densidade aparente e resistência à penetração permite detectar condições que poderiam estar afetando o crescimento das culturas. A geoestatística é uma ferramenta que ajuda na interpretação dos dados obtidos para ambas as variáveis, utilizando modelos com os quais podem ser feitas interpolações e mapas zoneados de pontos amostrados. O objetivo do trabalho foi validar uma metodologia para identificar e delimitar zonas de diferentes níveis de compactação do solo em um lote agrícola, como uma ferramenta para realizar um manejo diferencial do mesmo. O lote em estudo está localizado no centro da província de Buenos Aires e está destinado a agricultura contínua sob semeadura direta. As variáveis amostradas para a caracterização foram: resistência à penetração e densidade aparente, até uma profundidade de 450 mm. Os mapas obtidos por interpolação utilizando o método Kriging mostram diferentes estados de compactação do lote em estudo, com valores de resistência à penetração próximos a 1,5 MPa e superiores nas áreas de cabeceira, iniciando-se a 100 mm de profundidade. Por outro lado, na mesma profundidade, os valores de densidade aparente são superiores a 1,20 g cm⁻³, atingindo valores máximos de 1,41 g cm⁻³, entre 300-450 mm de profundidade. Ambas as variáveis descrevem um risco por compactação para o crescimento normal das raízes, destacando-se nos mapas de resistência à penetração as áreas de cabeceira, principalmente afetadas pelo excesso de tráfego. A metodologia utilizada permitiu identificar áreas do lote com possível resposta das culturas à descompactação mecânica, oferecendo a possibilidade de realizar um trabalho de zoneamento.

Palavras-chave: densidade; kriging; mapas

Introducción

La agricultura de precisión es una herramienta que está abriendo nuevas formas de abordar la producción agrícola, ya que la información y cantidad de datos que permite integrar ayudan a interpretar de mejor manera lo que está sucediendo en un área determinada. Esto permite optimizar la gestión de los equipos agrícolas y la aplicación variable de recursos, contribuyendo a la mejora en la toma de decisiones ([McBratney et al., 2005](#)).

Siguiendo este abordaje, la incorporación del análisis geoestadístico de los datos permite obtener zonas que relacionan el estado de las plantas y el manejo agronómico, mediante la determinación del comportamiento espacial de las variables en estudio. Además, actúa de base para gestionar una estrategia de muestreo y obtener datos representativos del área estudiada ([Best & León, 2013](#)).

Voorhees ([1989](#)) afirma que la compactación del terreno es una de las principales causas de la disminución de los rendimientos de los cultivos, ya que provoca un impedimento para el desarrollo del sistema radical de los mismos, limitando la normal y necesaria captación de los nutrientes.

La compactación del suelo es una propiedad que está significativamente influenciada por la variabilidad espacial y temporal ([Clark, 1996](#)). El conocimiento de esta variación permitiría definir zonas conflictivas y umbrales de profundidad, ante la necesidad de un

manejo diferencial o una labranza de remediación, la que dependerá además del tipo de cultivo a implantar ([Basso et al., 2003](#)).

La compactación se manifiesta como una ruptura del equilibrio entre las unidades estructurales, los poros, las grietas y fisuras. Esto trae aparejado una reducción en el drenaje, pérdida de aireación y de actividad biológica, y una disminución de la humedad necesaria para asegurar el crecimiento óptimo de los cultivos ([Sánchez Girón, 1996](#)). En la mayoría de los casos la compactación se encuentra ligada a la intensificación en la producción agropecuaria ([Elliott et al., 1977](#); [Botta et al., 2004](#); [Grosso et al., 2014a](#)).

Muchos autores han evaluado el efecto de la compactación a través de la variable densidad aparente, sin poder establecer hasta el momento un umbral único como limitante para el crecimiento de las raíces. Reynolds et al., ([2003](#)), Drewry & Paton, ([2005](#)) y Drewry, ([2006](#)), mencionan que densidades superiores a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ pueden impedir la elongación de la raíz o la aireación del suelo; Chidichimo et al. ([1997](#)), hallaron que valores entre 1,09 y $1,41 \text{ g cm}^{-3}$, afectan el crecimiento normal de la biomasa radical. Los valores críticos de densidad aparente de un suelo están directamente relacionados con la granulometría del mismo ([Hakansson, 1990](#)). En este aspecto, un concepto que adquiere relevancia como indicador del estado físico del suelo, es la compactación relativa, obtenida mediante el cociente entre la densidad aparente a campo y la densidad máxima en ensayos Proctor ([Carter, 1990](#)).

La resistencia a la penetración es otra variable comúnmente utilizada para determinar el estado de compactación de un suelo. Las raíces ejercen presiones máximas de 0,9 a 1,5 MPa ([Eavis et al., 1969](#); [Stolzy & Barley, 1968](#)). Algunos autores consideran que la resistencia a la penetración crítica para el normal crecimiento de raíces, medida con penetrómetro de cono, resulta entre 3 y 4 veces superior a la presión mencionada ([Pilatti & Orellana, 1993](#); [Sene et al., 1985](#)). No obstante ello, en gran parte de la bibliografía se adoptan valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa, como suficiente para que el crecimiento de las raíces resulte disminuido; en similar sentido, valores superiores a 2 MPa serían suficientes para impedirlo ([Threadgill, 1982](#)).

Es frecuente que en lotes bajo producción agrícola el estado de compactación presente variabilidad espacial ligada al tráfico de maquinarias ([Upadhyaya et al., 1994](#)), ya que el mismo no es uniforme sobre toda la superficie; los límites de los lotes (cabeceras) reciben mucho mayor tráfico que las zonas interiores.

En situaciones críticas y ante la necesidad de realizar una labor de descompactación, la posibilidad de ajustar en área y en profundidad la práctica de remoción reduciría el costo de la operación, que de por sí, se caracteriza por la alta demanda energética ([Botta et al., 2004](#); [Grosso et al., 2014b](#)). La evaluación previa de la localización y alcance de la capa compactada debe conocerse como paso previo a considerar una descompactación mecánica ([Draghi et al., 2011](#)), más aún si se pretende implementar con éxito una labranza de precisión ([Magaña et al., 2015](#)). Raper et al., ([2000](#)) afirma que al momento de definir la labor de descompactación, sólo ajustando la profundidad de labranza, se puede ahorrar hasta un 50% de combustible, respecto a labores homogéneas.

A través del análisis geoestadístico de resistencia a la penetración y densidad aparente, y utilizando métodos de interpolación como el Kriging se pueden obtener mapas para identificar zonas compactadas y realizar un manejo localizado de este fenómeno ([Ramírez-López et al., 2008](#)). La posibilidad de interpolar en el espacio el valor de una variable en sitios no muestreados, tiene la ventaja no sólo de reducir el costo de muestreo, sino también, de facilitar la tarea de campo y de laboratorio ([Gallardo, 2006](#)). El método

por kriging ha sido valorado como el mejor para interpolar los datos de puntos, ya que minimiza la varianza del error mediante una combinación lineal ponderada de los datos (Panagopoulos et al., 2006).

La zonificación de las áreas de riesgo por compactación, junto con la información de la profundidad a la que se encuentra la capa compactada, ayudaría a la toma de decisiones sobre la necesidad de intervención mecánica, aumentaría la eficiencia de la labor, en caso de efectuarla, y permitiría realizar una mejor gestión de los recursos.

El objetivo de este trabajo fue validar una metodología para identificar y delimitar zonas de diferente nivel de compactación del suelo en un lote agrícola, como herramienta para realizar un manejo diferencial del mismo.

Materiales y métodos

El lote bajo estudio se encuentra ubicado en el partido de Azul (Latitud Sur $36^{\circ} 49' 49''$, Longitud Oeste $59^{\circ} 53' 18''$), provincia de Buenos Aires (Figura 1). Posee un suelo Argiudol Petrocálcico (Soil Taxonomy 2014), con presencia de tosca a partir de los 900 mm de profundidad. Cuenta con una superficie de 7,5 ha destinada a agricultura continua bajo la modalidad de siembra directa; siendo, maíz-soja, la última rotación realizada. El lote fue dividido en cinco sectores, identificándolos como zona central y zonas de cabecera: cabecera Noreste (ingreso al lote); cabecera Suroeste (menor tráfico); cabecera Sureste y cabecera Noroeste (mayor frecuencia de giro de las maquinarias). En las cabeceras es donde puede suponerse un mayor tránsito con maquinarias y posibles problemas de compactación.



Figura 1: Ubicación del lote bajo estudio. Coordenadas geográficas y en UTM

Una vez delimitadas las zonas, se midieron las propiedades físicas del suelo:

Resistencia a la penetración (RP): utilizando un penetrómetro de cono de 12,83 mm de diámetro, construido bajo norma ASABE S.313y con almacenamiento digital de la información. Se realizaron 136 mediciones; en la zona central estuvieron separadas cada 25 m aproximadamente ([Orduz Salamanca, 2014](#)), mientras que, en las cabeceras, tuvieron menor separación. Se geoposicionaron los puntos con un GPS Garmin Etrex 20 con sistema de referencia WGS84 y proyección UTM zona 21H ([Figura 2](#)). Se promediaron los datos de manera de tener estratos de 0-100 mm, 100-200 mm, 200-300 mm y 300-450 mm. Las mediciones fueron tomadas a pocos días de una lluvia.

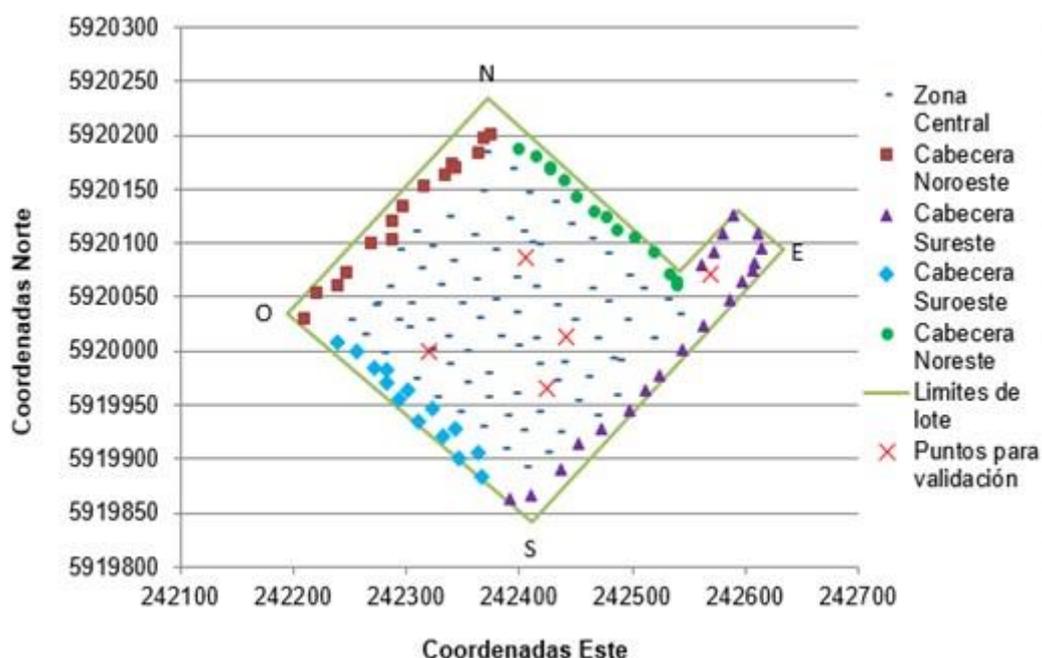


Figura2: Distribución del muestreo de resistencia a la penetración.

Densidad aparente (Dap): se tomaron 42 muestras de suelo, hasta los 450 mm, con un barreno hidráulico de 450 mm de longitud y 61 mm de diámetro. Para reducir costos y tiempo en la etapa de procesamiento de muestras, se utilizó una cuadrícula mayor, cada 50 m en el sector central ([Molin et al., 2006](#)), respecto a la utilizada para resistencia a la penetración ([Figura 3](#)). Posteriormente cada muestra fue seccionada en estratos en sentido vertical, de la misma manera que para resistencia a la penetración. Se determinó humedad del suelo por el método gravimétrico y capacidad de campo, siguiendo la metodología propuesta por García Petillo et al. ([2012](#)). A los resultados de humedad se les realizó un ANOVA y un test de comparación de medias, para determinar si entre las zonas delimitadas había diferencias de humedad.

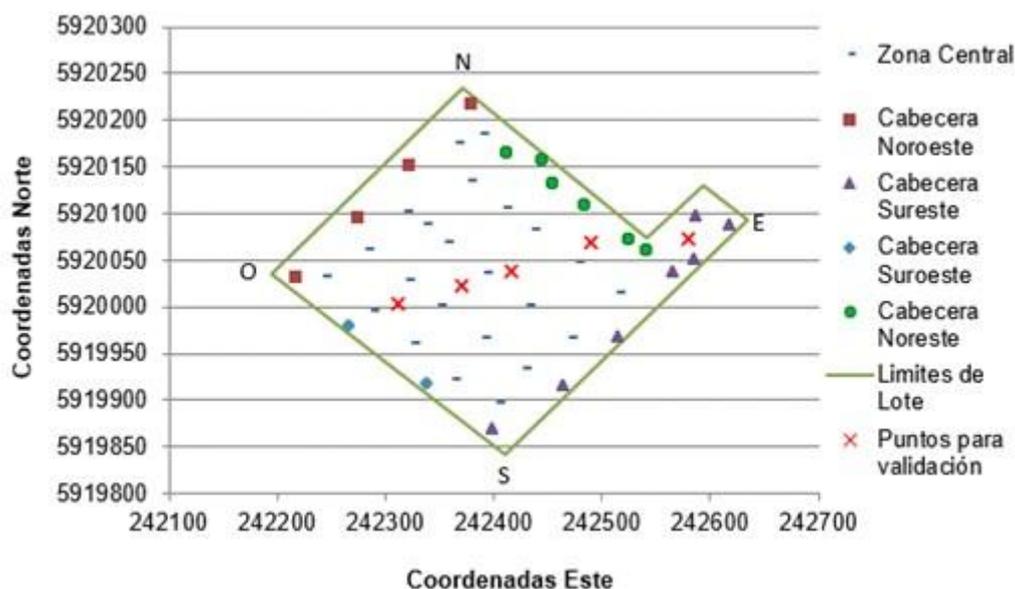


Figura 3: Distribución del muestreo de densidad aparente.

Se realizó un análisis previo de datos mediante estadística descriptiva. El mismo incluyó cálculo de la media, mediana, coeficiente de asimetría y curtosis y coeficiente de variación (CV), utilizando la clasificación de Warrick & Nielsen (1980). Además, se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov con el programa estadístico SPSS 15, para verificar la normalidad de los datos (Jaramillo, 2012). Cuando los datos se alejaron de la distribución normal, se procedió a realizar una transformación logarítmica de los mismos. Para la estimación de los variogramas se utilizó el programa de geostatística SGeMS, Stanford Geostatistical Modelling Software (Remyet al. 2009). Los variogramas se realizaron en 4 direcciones 0°-45°-90°-135°. A partir del mejor ajuste a un modelo teórico, se obtuvieron los parámetros, Nugget (efecto pepita), Sill (meseta), y rango, necesarios para realizar las interpolaciones. Se evaluó también el tipo de dependencia espacial según una escala que deriva de la proporción de la varianza no estructural respecto a la varianza total (Cambardella et al. 1994). Así, la dependencia espacial se puede clasificar en: Fuerte (efecto pepita menor a 25 %), Moderada (efecto pepita entre 25 % y 75 %) y Débil (efecto pepita mayor a 75%).

La predicción de las variables analizadas se realizó siguiendo un procedimiento de dos etapas (Garbanzo-León et al., 2017). En una primera instancia, y una vez determinada la dependencia espacial, se efectuó la interpolación de cada propiedad mediante Kriging simple con el programa gvSIG, utilizando el método de clasificación por cortes naturales; en esa instancia se obtuvieron además los errores calculados para cada una de las observaciones. Con el fin de mejorar el ajuste de las interpolaciones, al valor original de cada observación le fue sustraído el error calculado en la primera interpolación. En una segunda instancia, con los valores resultantes del paso previo, se interpoló nuevamente mediante el método de Kriging simple y se realizó la validación de los mapas interpolados. Esto se llevó a cabo mediante las técnicas “validación de campo” y “validación cruzada” (Henríquez et al., 2013) y se calculó el coeficiente de determinación (R^2) entre los valores reales y los de interpolación. Para realizar la validación de campo de cada variable se tomaron muestras adicionales geoposicionadas, (Figura 2 y 3).

Una vez obtenidos los mapas de RP en los distintos estratos se cuantificó la superficie del lote con RP superior a 1,5 MPa utilizando el software gvSIG.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad del suelo

El análisis de varianza indicó que en el estrato superior no hubo diferencias significativas de humedad entre zonas evaluadas. Para el estrato 100-200 mm se observaron diferencias significativas entre la cabecera Suroeste y Noreste. En el estrato 200-300 mm se evidencia diferencia significativa entre la cabecera Suroeste y el resto de las zonas. Por último, el estrato 300-450 mm presenta diferencias significativas entre la cabecera Suroeste y las cabeceras Noroeste y Noreste ([Tabla 1](#)). La relativa homogeneidad de humedad del suelo entre la mayoría de las zonas, salvo la cabecera Suroeste que resultó ser la más húmeda, facilita la interpretación de la variable resistencia a la penetración. En promedio, la humedad del suelo al momento del muestreo fue de 24 % y corresponde a un 82 % del contenido de agua a capacidad de campo. Las lluvias ocurridas poco tiempo antes de la medición explican la uniformidad del contenido de humedad en el lote.

Tabla 1. Porcentaje de humedad gravimétrica (HG %) en los distintos estratos de suelo.

Zonas/ Estratos (mm)	0-100	100-200	200-300	300-450
	HG (%)			
Cabecera Suroeste	27,30 a	26,35 b	28,15 b	25,80 b
Cabecera Noroeste	25,29 a	24,16 ab	24,28 a	23,50 a
Cabecera Noreste	21,66 a	21,12 a	22,46 a	22,78 a
Cabecera Sureste	24,46 a	23,19 ab	24,21 a	23,76 ab
Zona Central	24,12 a	24,18 ab	24,60 ab	23,97 ab

Letras minúsculas diferentes entre filas, indican diferencias significativas entre zonas, a una misma profundidad. Test de Tukey, nivel de significancia de $p \leq 0,05$

Resistencia a la Penetración (RP)

A partir del análisis de estadística descriptiva se detectó que los valores de resistencia a la penetración estaban alejados de la distribución normal; por lo tanto, se procedió a realizar una transformación de los mismos y un nuevo análisis de los resultados ([Tabla 2](#)).

Tabla 2. Estadística descriptiva para los datos de resistencia a la penetración por estratos.

Estadísticos	Estratos (mm)			
	0-100	100-200	200-300	300-450
Mediana	6,67	7,30	7,34	7,49
Promedio	6,63	7,35	7,39	7,47
Máximo	7,79	8,56	8,66	8,70
Mínimo	4,74	6,81	6,61	6,55
Desvío Estándar	0,51	0,31	0,35	0,34
Coef. de Variación	7,63	4,20	4,77	4,59
Curtosis	1,27	2,15	1,75	1,87
Coef. de asimetría	-0,48	1,20	1,20	0,41

Los datos transformados poseen una baja variabilidad para todos los estratos, con un coeficiente de variación menor al 12%, según la clasificación de Warrick & Nielsen (1980). Al observarse los valores, media y mediana son similares y los valores de asimetría y curtosis son cercanos a cero, lo que indica una aproximación a la distribución normal (Mogollón, 2012). Este comportamiento en los datos, si bien no es indispensable, es recomendado, ya que permite tener varianzas y medias homogéneas en todos los grupos de distancias definidos (Jaramillo, 2012), mejorando la calidad de la interpolación.

La variable RP (Tabla 3) muestra una estructura espacial que se ajustó al modelo Gaussiano, para todos los estratos. Con la intensidad de muestreo utilizada los datos evaluados presentan un porcentaje de variación espacial moderada, con un efecto pepita entre 25% y 75% de la varianza total (Cambardella et al., 1994).

Tabla 3. Parámetros de los variogramas, para la variable resistencia a la penetración por estratos.

Estratos (mm)	Modelo	Co	Co+C	C/(Co+C)	% Pepita	Rango (A)	Validación	Validación
							de campo	cruzada
							R ²	R ²
0-100	Gaus	0,18	0,31	0,41	0,58	250	0,73	0,84
100-200	Gaus	0,05	0,14	0,62	0,37	247,5	0,68	0,95
200-300	Gaus	0,07	0,16	0,56	0,43	250	0,65	0,94
300-450	Gaus	0,08	0,14	0,39	0,6	242,5	0,69	0,92

Efecto pepita (C0), varianza estructural (C), meseta (C0+C), porcentaje (C/C0+C), rango (A), validación de campo, validación cruzada.

En los mapas obtenidos por interpolación, se puede observar la distribución espacial de la variable resistencia a la penetración en cada estrato estudiado.

Las interpolaciones dan como resultado, en la validación cruzada, valores de R² entre el 80 % y el 95 %. La confiabilidad de los mapas además se respalda en el R² obtenido de la validación de campo, que está entre el 60 % y el 70 % (Tabla 3). Esto significa que la

mayor parte de la variabilidad en los datos de RP observados, son explicados por el modelo de interpolación.

El mapa interpolado para el estrato 0-100 mm, muestra bajo riesgo de impedimento al crecimiento de las raíces, con valores máximos de RP cercanos a 1MPa (Figura 4 a) en la cabecera Noreste y parte de la Sureste. En los estratos 100-200 mm y 200-300 mm se repite dicha zona como la más compactada del lote, con valores entre 1,5 a 2 MPa (Figura 4b y 4 c); estas áreas podrían generar restricción al crecimiento de las raíces (Eavis et al., 1969; Stolzy & Barley, 1968; Taylor & Ratcliff, 1969), más aún en períodos secos. Estos resultados evidencian un efecto importante del tráfico de la maquinaria agrícola sobre la compactación del suelo (Upadhyaya et al., 1994), cuantificándose una superficie de 2,5 ha con valores superiores a 1,5 MPa. En estratos de alta ocupación por las raíces existe un claro aumento del estado de compactación en la cabecera Noreste y parte de la cabecera Sureste donde se encuentra el acceso al lote (Figura 4 b y 4 c). Estos sectores se diferencian visiblemente de la zona central y el resto de las cabeceras, cuyos valores de RP están entre 1 MPa y 1,5 MPa. Para el estrato 300-450 mm el estado de compactación alcanza valores máximos iguales o superiores a 2 MPa, siendo esto lógico si se tiene en cuenta la incidencia de un fuerte horizonte arcilloso que predomina a esta profundidad (Sene et al., 1985).

La cabecera Suroeste es la menos transitada, ya que los accesos al potrero se ubican del lado opuesto a la misma, y el sentido habitual de tráfico es Sureste-Noroeste.

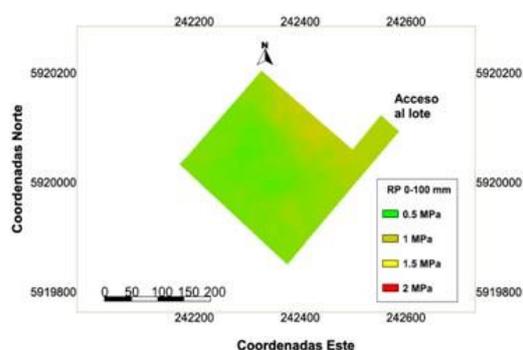


Figura 4 a: Estrato 0-100 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

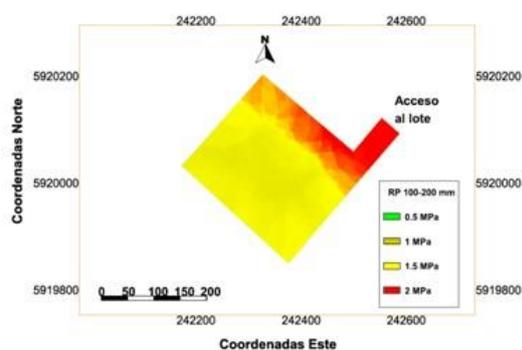


Figura 4 b: Estrato 100-200 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

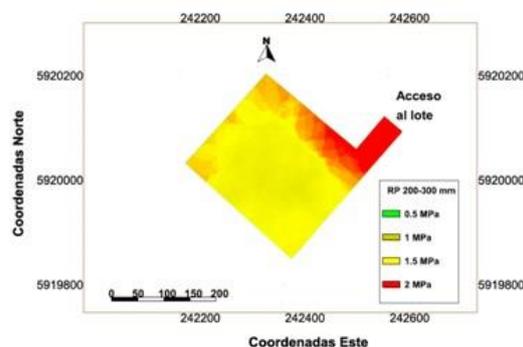


Figura 4 c: Estrato 200-300 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

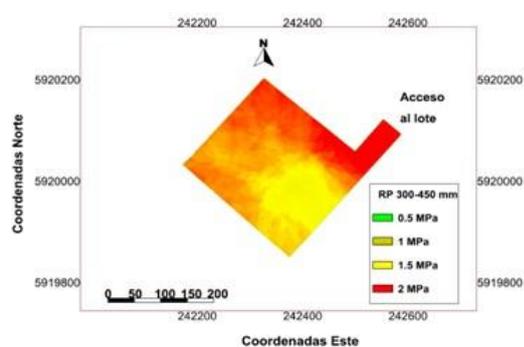


Figura 4 d: Estrato 300-450 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

Figura 4. Resistencia a la penetración del lote (MPa), interpolación por Kriging, para cada estrato (a: 0-100 mm, b: 100-200 mm, c: 200-300 mm, d: 300-450 mm).

Densidad aparente (Dap)

Los datos originales de Dap presentan una baja variabilidad para todos los estratos, con un coeficiente de variación menor al 12%. Los valores media y mediana son similares y los valores de asimetría y curtosis son cercanos a cero, lo que indica una aproximación a la distribución normal (Mogollón, 2012), (Tabla 4). A diferencia de lo ocurrido con la RP no hubo en este caso necesidad de transformación previa.

Tabla 4. Estadística descriptiva para los datos de densidad aparente por estratos.

Estadísticos	Estratos (mm)			
	0-100	100-200	200-300	300-450
Mediana	1,16	1,25	1,31	1,37
Promedio	1,16	1,26	1,29	1,35
Máximo	1,3	1,4	1,41	1,53
Mínimo	0,93	1,13	1,16	1,18
Desvío Estándar	0,07	0,06	0,06	0,08
Coef. de Variación	6,01	4,57	4,97	6,11
Curtosis	1,25	0,00	-0,80	-0,14
Coef. de asimetría	-0,34	0,17	-0,42	-0,30

Los parámetros definidos por los variogramas (Tabla 5) para la Dap, muestran una estructura espacial que se ajustó al modelo esférico. La variación espacial es moderada a fuerte según la clasificación de Cambardella et al. (1994), con valores de efecto pepita cercanos al 25 % de la varianza total.

Tabla 5. Parámetros de los variogramas para la variable densidad aparente por estratos.

Estratos (mm)	Modelo	Co	Co+C	%	%	Rango (A)	Validación	Validación
							de campo	cruzada
				$C/(C_0+C)$	Pepita		R^2	R^2
0-100	Esferico	0	0,008	1	0	400	0,63	0,44
100-200	Esferico	0,002	0,006	0,75	0,25	400	0,57	0,84
200-300	Esferico	0,003	0,009	0,69	0,3	400	0,65	0,85
300-450	Esferico	0,003	0,010	0,71	0,28	400	0,56	0,79

Efecto pepita (C₀), varianza estructural (C), meseta (C₀+C), porcentaje (C/C₀+C), rango (A), validación de campo, validación cruzada.

Al igual que para la variable RP, se realizaron las interpolaciones siguiendo un proceso de dos etapas y se obtuvo un mapa de densidad aparente por cada estrato.

Las interpolaciones dieron como resultado, en la validación cruzada, valores de R² entre el 45 % y el 80 %, menores que los obtenidos para RP. Por su parte el R² obtenido de la validación de campo estuvo entre el 55 % y el 60 % (Tabla 5). Esto significa que más del 50 % de la variabilidad en los datos de Dap observados son explicados por el modelo de interpolación, aunque con menor nivel de confiabilidad que para la variable RP.

En los mapas interpolados se puede observar que, salvo en algunas zonas en el primer estrato (Figura 5 a), los valores de densidad aparente son superiores a $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ y se ubican dentro del rango citado por Chidichimo et al. (1997) de $1,09 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,41 \text{ g cm}^{-3}$, como causantes de la disminución del crecimiento de las raíces. Las densidades halladas (Figura 5a, 5b, 5c y 5d), son similares a las mencionadas por Grosso et al. (2014a), $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ en el estrato 0-100 mm, hasta $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ en el estrato 300-450 mm de profundidad para un suelo de similares características del centro de la provincia de Buenos Aires. Los valores más bajos de Dap pertenecen al vértice Oeste y parte de la cabecera Suroeste del lote; esto podría estar asociado, tanto con una variación en la textura, propiedad a la que esta variable es muy sensible, como con un menor tráfico de la maquinaria agrícola. En los estratos entre 100 mm y 300 mm (Figura 5 c y 5 d), donde se desarrolla una parte significativa de la biomasa de raíces los valores de Dap se encuentran entre $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,40 \text{ g cm}^{-3}$, superando los umbrales citados por Reynolds et al. (2003), Drewry & Paton (2005) y Drewry (2006). Las zonas de mayor Dap se corresponden con la cabecera Noreste y la zona de acceso al lote, coincidiendo con el análisis de RP.

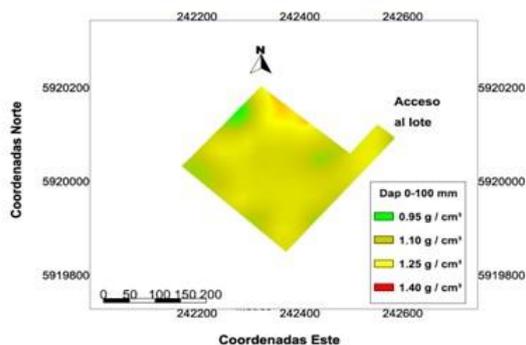


Figura 5 a: Estrato 0-100 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

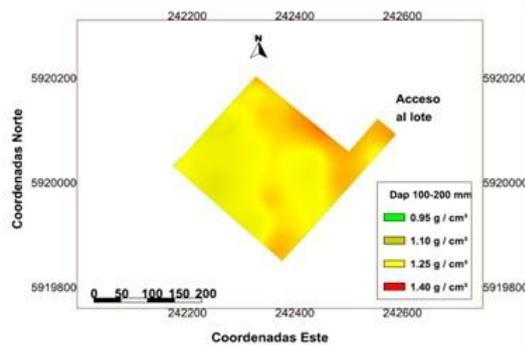


Figura 5 b: Estrato 100-200 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

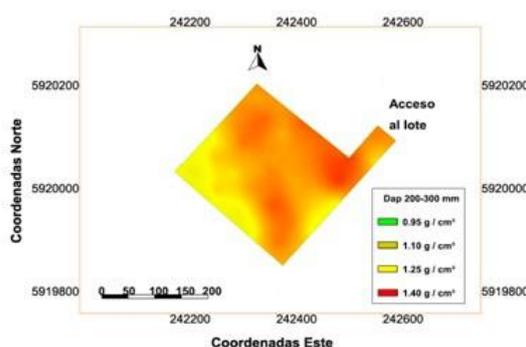


Figura 5 c: Estrato 200-300 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

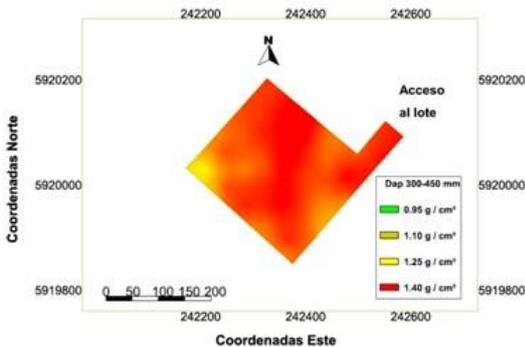


Figura 5 d: Estrato 300-450 milímetros. Coordenadas Norte (eje y) y coordenadas Este (eje x) en metros (m).

Figura 5. Densidad aparente, interpolación por Kriging, para cada estrato (a: 0-100 mm, b: 100-200 mm, c: 200-300 mm, d: 300-450 mm).

La variable Dap tuvo rangos de variación más estrechos que la RP, en cada uno de los estratos medidos, dificultando la separación, por sí misma, de zonas susceptibles de responder a la descompactación. Su utilidad entonces estaría dada en la reafirmación de la información obtenida a través de la variable RP.

De las interpolaciones realizadas para ambas variables, resistencia a la penetración fue más predecible que densidad aparente, resultado de la estructura de datos, de la intensidad de muestreo y de la menor dependencia a otras propiedades del suelo.

En general los mapas obtenidos por estratos y la cuantificación de la superficie con valores de RP superiores a 1,5 MPa, estarían indicando que sólo es necesario descompactar 2,3 ha, es decir, sólo un 30 % de la superficie del lote, ahorrando un 70 % de costo de labor. Por otro lado, se estaría evitando la pérdida de cobertura y la pérdida de capacidad portante del suelo, es decir, de soportar cargas aplicadas sobre el mismo, tornándose más susceptible a procesos de reconsolidación, ante manejos posteriores inadecuados ([Spoor et al. 2003](#)).

Conclusiones

La metodología utilizada de medición e interpolación de las variables resistencia a la penetración y densidad aparente permitió identificar zonas de un lote con posible respuesta de los cultivos a la descompactación mecánica; esto permite la realización zonificada de una labor onerosa, permitiendo el ahorro de recursos, en comparación con el laboreo total del lote.

Considerando la mayor complejidad, trabajo y costo requerido para tomar las muestras de densidad aparente, la resistencia a la penetración permite definir de manera más efectiva, los diferentes estados de compactación del suelo.

Agradecimientos

Al Sr. Alberto Lier; Propietario del establecimiento donde se realizó el estudio.

Bibliografía

- BASSO B, SARTORI L, BERTOCCO M, OLIVIERO G. (2003). Evaluation of variable depth tillage: economic aspects and simulation of long term effects on soil organic matter and soil physical properties. In: Stafford, J., Werner, A. (Eds.), Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, EU. p. 62–67.
- BEST S, LEÓN L (2013). Monitoreo de variables hídricas mediante termografía infrarroja. En S. Best, L. León, R. Quintana, H. Aguilera, F. Flores, V. Concha, & S. S. Best (Ed.), Viticultura de Precisión Terroir Digital. p. 24-50).
- BOTTA GF, JORAJURÍA D, BALBUENA R, ROSATTO H (2004) Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil and Tillage Research*. (1): 53-78.
- CAMBARDELLA CA, MOORMAN TB, PARKIN TB, KARLEN DL, NOVAK JM, TURCO RF, KONOPKA AE (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America journal*. 58(5), 1501-1511.
- CARTER MR (1990). Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* (70): 425-433.
- CHIDICHIMO HO, ASBORNO MD, ARAGÓN A (1997) Enraizamiento de maíz: respuesta genotípica a tratamientos de compactación y humedad del suelo. VI Congreso Nacional. Pergamino (BA) Argentina. Compendios de trabajos presentados. 2 (3): 173-179.



CLARK RL (1996). Soil strength variability within fields. In: Proceedings of the 3th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, Minnesota, USA. p. 201–210.

DRAGHI LM, PALANCAR TC, SORACCO G, LOZANO L, JORAJURIA D (2011) Compactación bajo siembra directa. <http://www.faz.unt.edu.ar/images/stories/pdfs/pva/1170.pdf> Acceso: 03 de noviembre de 2017.

DREWRY JJ, PATON RJ (2005). Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43: 525–531.

DREWRY JJ (2006). Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. *Agric. Ecosys. Environ.* 114:159–169.

EAVIS BW, RATLIFF LF, TAYLOR HM (1969). Use of a dead-load technique to determine axial root growth pressure. *Agronomy Journal.* 61(4): 640-643.

ELLIOTT J, ELLIS F, POLLARD F (1977) Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. 1. Spring barley in a sandy loam soil: introduction, aerial growth and agronomic aspects. *Journal of Agricultural Science.* (89): 621-630.

GALLARDO A (2006). Geostadística. *Revista ecosistemas.* 15(3). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/161> . Acceso: 15 de diciembre de 2017.

GARBANZO-LEÓN G, ALEMÁN-MONTES B, ALVARADO-HERNÁNDEZ A, HENRÍQUEZ-HENRÍQUEZ C (2017). Validación de modelos geostatísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.* (93): 20-41.

GARCÍA PETILLO M, PUPPO L, HAYASHI R, MORALES P (2012) Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Agas/Avda. E. Garzónh. <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/Metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf> . Acceso: 20 de noviembre de 2017.

GROSSO JA, BONGIORNO CV, RESSIA JM, MENDIVIL GO, DE PABLO MC, BALBUENA R (2014a). Descompactación superficial de un suelo bajo siembra directa. En: Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias. ISBN 978-987-24771-6-5. Editorial: AACCS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo. Trabajo: 0243B. p.6.

GROSSO JA, RESSIA JM, BONGIORNO CV, MENDIVIL GO, DE PABLO MC, BALBUENAR (2014b). Eficiencia energética de la descompactación de un suelo bajo siembra directa. En: Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias. ISBN 978-987-24771-6-5. Editorial: AACCS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo. Trabajo: 0243 A. p. 6.

HAKANSSON I. (1990) A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, v.16, p.105-120, 1990.

HENRÍQUEZ C, MÉNDEZ JC, MASÍS R (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis Kriging y su validación. *Agronomía costarricense.* 37(2): 71-82.

JARAMILLO DF (2012) Variabilidad Espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias.* 1(1): 73-87.



MAGAÑA C, GABRIEL S, LÓPEZ LÓPEZ JA, CADENA ZAPATA M, REYNOLDS CHÁVEZ MA, CUERVO PIÑA N, RAMÍREZ FUENTES G (2015). Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. *Terra Latinoamericana*. 33(2): 119-128.

MCBRATNEY A, WHELAN B, ANCEV T, BOUMA J (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision agriculture*. 6 (1): 7-23.

MOGOLLÓN MR (2012) Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá. <http://www.bdigital.unal.edu.co/7006/> . Acceso: 25 de noviembre de 2017.

MOLIN JP, MAGALHÃES RPD, FAULIN GD (2006). Spatial analysis of cone index under no-till and its relationship with soil physical attributes. *Engenharia Agrícola*. 26(2): 442-452.

ORDUZ SALAMANCA K (2014) Variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración del suelo. Centro Agropecuario Marengo - Sabana de Bogotá". Universidad militar nueva Granada Facultad de Ingeniería programa de Ingeniería Civil Especialización en Geomática. 18 p.

PANAGOPOULOS TK, JESUS J, ANTUNES MDC, BELTRÃO J (2006) Analysis of spatial interpolation for optimizing management of a salinized field cultivated with lettuce. *European Journal of Agronomy*. 24: 1-10. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030105000389> . Acceso: 05 de diciembre de 2017.

PILATTI MA & DE ORELLANA JA (1993). Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El intervalo hídrico óptimo. In 14º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza, Argentina.

RAMÍREZ-LÓPEZ L, REINA-SÁNCHEZ A, CAMACHO-TAMAYO JH (2008) Variabilidad espacial de atributos físicos de un Haplustol Típico de los Llanos Orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola*. 28(1): 55-63. <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n1/a06v28n1.pdf> . Acceso 12 de noviembre de 2017.

RAPER RL, REEVES CH, BURMESTER CH, AND SCHWAB EB (2000). Tillage depth, tillage timing and cover crop effects on cotton yield soil strength and tillage requirements. *Applied Engineering in Agriculture*. (16): 379-385.

REYNOLDS WD, YANG XM, DRURY CF ZHANG TQ, TAN CS (2003) Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Can. J. Soil Sci*. 83: 318-393.

REMY N, BOUCHER A, WUJ (2009). *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide*. Cambridge University Press. ISBN 0521514142.

SÁNCHEZ GIRÓN R (1996) *Dinámica y mecánica de suelos*. Ed. Aerotécnicas. Madrid. 426 pp.

SENE M, VEPRASKAS MJ, NADERMAN GC, DENTON HP (1985) Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*. 49(2): 422-427.

SPOOR G, TIJINK F & WEISSKOPF P (2003). Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil Till. Res*. Taylor, H. & Burnett, E. 1963. Some effects of compacted soil pans on plant growth in the southern Great Plains. *Soil Sci*. (18): 235-236.

STOLZY LH, BARLEY KP (1968). Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. *Soil Science*. 105(5): 297-301.

TAYLOR HM & RATCLIFF LF (1969). Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci*. 108, 113-119.



THREADGILL E (1982) Residual tillage effects as determined by cone index. Transactions of the ASAE, 25 (4):859-863,867. <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33627>. Acceso: 20 de diciembre de 2017.

UPADHYAYA S, CHANCELLOR W, PERUMPRAL J, SCHAFFER R, GILL W, VANDERBERG G (1994). Advances in Soil Dynamics. Vol. Ed. De Vore-Hansen. St. Joseph, MI. p. 313.

VOORHEES WB (1989) Root activity related to shallow and deep compaction. In Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils. p. 173-186).

WARRICK AW, NIELSEN DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In Hillel, D Applications of soil physics. New York: Academic Press.

GROSSO, J. A., RESSIA, J. M., BONGIORNO, C. V., y MENDIVIL, G. O. (2022). Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística. *Ciencias Agronómicas*, (34), e004. <https://doi.org/10.35305/agro34.e004>

Copyright (c) 2019 Javier Alejandro Grosso, Juan Manuel Ressia, Carlos Vicente Bongiorno, Gustavo Oscar Mendivil



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).