

RELACION ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE CON PROPIEDADES DEL SUELO Y NUTRIENTES

MAURICIO SIMÓN¹; NAHUEL PERALTA^{2,3*} & JOSÉ LUIS COSTA^{3,4}

Recibido: 20-12-12

Recibido con revisiones: 28-02-13

Aceptado: 22-03-13

RESUMEN

El manejo sitio-específico demanda la identificación de subregiones con características homogéneas (zonas de manejo). Sin embargo, la determinación de zonas es dificultosa por las complejas relaciones y variabilidad espacial de las propiedades de suelo, que afectan los patrones espaciales del rendimiento de los cultivos. En el presente trabajo evaluamos si la conductividad eléctrica aparente (CE_a) funciona como un potencial estimador de las propiedades de suelo y nutrientes, y una herramienta para la delimitación de zonas de manejo. La CE_a fue mapeada en 58 ha en dos lotes de producción, ubicados al sur de la provincia de Córdoba, próximo a la localidad de Canals, compuestos de Haplustoles. Las propiedades de suelo y la CE_a fueron analizadas usando estadísticos descriptivos, correlaciones simples y un ANOVA. Los contenidos de partículas finas (arcilla y limo), arena y materia orgánica mostraron altas correlaciones con la CE_a ($r > 0,6$; $p \leq 0,001$), mientras que el contenido de P y pH fueron menores ($r = -0,47$ y $0,42$, respectivamente). Las correlaciones entre la CE_a y la conductividad eléctrica del extracto (CE_{ext}), $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$ fueron débiles e inconsistentes. La medición de la CE_a exitosamente delimitó tres zonas de manejo basadas sobre los contenidos de partículas finas (arcilla y limo), arena y MO. Mientras que esto no puede ser considerado para diferenciar zonas de manejo basadas sobre los contenidos de $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$ y CE_{ext} porque los valores fueron muy bajos y hubo escasa variación entre las clases de CE_a . Estos resultados sugieren que los mapas de CE_a a escala de lote tienen un potencial para aplicar manejo sitio-específico de los cultivos (MSEC).

Palabras clave. Agricultura de Precisión, zonas de manejo, variabilidad espacial, nutrientes.

RELATIONSHIP BETWEEN APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY WITH SOIL PROPERTIES AND NUTRIENTS

ABSTRACT

Site-specific management demands the identification of small areas within fields with homogeneous characteristics (management zones). However, determination of these homogeneous sub-fields is difficult because of complex relationships and spatial variability of soil properties, which affect spatial patterns of yield crop. In this paper, we evaluated apparent electrical conductivity (EC_a) functions as potential estimators of soil properties and nutrients, and their possible use as tools for the delimitation of homogeneous areas. EC_a mapping of a total of 58 ha was performed on two Haplustoll production fields, located south of the province of Cordoba, near the town of Canals. Soil, nutrients and EC_a were analyzed using descriptive statistics, simple correlations and ANOVA. Fine particles (clay, silt), coarse sand and soil organic matter (OM) content exhibited higher correlation with EC_a ($r > 0,6$; $p \leq 0,001$), whereas P content and pH were lower ($r = -0,47$ and $0,42$, respectively). The correlation among EC_a and extract electrical conductivity (EC_{ext}), $N-NO_3^-$ and $S-SO_4^{2-}$ were weak or inconsistent. EC_a measurements successfully delimited three homogeneous soil zones associated to spatial distribution of fine particles (clay and silt), sand and OM content. However, it would not be advisable to differentiate management zones based on $N-NO_3^-$, $S-SO_4^{2-}$ content and EC_{ext} because the values were very low and there was little variation between EC_a classes. These results suggest that field-scale EC_a maps have may be a useful tool for site-specific crop management (SSCM).

Key words. Precision agriculture, management zones, spatial variability, nutrients..

1 Aceitera General Deheza (AGD);

2 CONICET;

3 Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FCA-UNMdP) y;

4 Estación Experimental INTA- Balcarce, C.C. 276 (7620) Balcarce, Argentina.

* Autor de contacto: nperalta21@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo físico-químicas (textura, contenido de materia orgánica, concentración de sales, pH del suelo, entre otras), presentan variabilidad espacial dentro del lote, las cuales pueden influenciar el crecimiento y desarrollo de los cultivos y; por ende, la distribución espacial del rendimiento en grano (Johnson *et al.*, 2001; Sudduth *et al.*, 2003; Corwin *et al.*, 2005). La variabilidad espacial de los suelos es causada por interacciones entre procesos físicos, químicos y biológicos que actúan simultáneamente con diferente intensidad (Mallarino & Vittry, 2004). Hay que considerar que el manejo uniforme de los lotes no tiene en cuenta la variabilidad existente, en consecuencia, no es una estrategia de manejo eficiente (Moral *et al.*, 2010). Por ende, una comprensión de la distribución espacial de las propiedades físico-químicas del suelo es importante para aplicar manejo sitio-específico de los cultivos (MSEC). El mismo es definido como una subdivisión de los lotes en áreas homogéneas para aplicar manejo diferencial en función del potencial del sitio (Bullock *et al.*, 2007), con el objetivo de mejorar la eficiencia productiva y optimizar el uso de insumos en términos agronómicos, económicos y ambientales (Corwin & Lesch, 2010).

Un método utilizado para muestrear la variabilidad espacial es el muestreo por grilla, el mismo requiere densa cantidad (0,2 ha) de muestras elevando los costos operativos (Mallarino & Vittry, 2004). Otra opción es encontrar un método más económico y sencillo. El muestreo por zonas (MZ) sería un método para identificar la variabilidad del suelo; el mismo asume que se puede clasificar al lote en áreas homogéneas (referidas a zonas) que reflejen diferencias entre las propiedades del suelo (Johnson *et al.*, 2001). El MZ permite disminuir los costos operativos y mejorar la eficiencia, sin perder información sobre la variabilidad del lote (Shaner *et al.*, 2008). Un método que está recibiendo mucha atención para realizar los MZ es la medición georeferenciada de la Conductividad Eléctrica Aparente del suelo (CE_a) (Corwin *et al.*, 2003; Moral *et al.*, 2010). La CE_a está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, como pueden ser la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH, Ca^{+2} y Mg^{+2} , tipos de suelo, entre otras (Corwin & Lesch, 2005; Sudduth *et al.*, 2005; Serrano *et al.*, 2010; Terrón *et al.*, 2011; Peralta *et al.*, 2013). Una ventaja adicional que posee este método, es que los patrones de distribución espacial de la CE_a no cambian en el tiempo, por lo que las áreas delimitadas son repetibles en el tiempo, aún bajo distintas condiciones de suelo (Veris Technologies, 2001; Sudduth *et al.* 2001; Sudduth *et al.* 2003; Farahani *et al.*, 2007). En Argiudoles y Paleudoles del Sudeste Bonaerense, Peralta *et al.*, (2012, 2013) observaron que la CE_a es

un potencial estimador de la variabilidad espacial del contenido de arcilla y humedad del suelo. Considerando que el contenido de arcilla es estable en el tiempo, está asociada con el contenido de humedad del suelo y afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, los mapas de CE_a tienen un potencial para delimitar zonas potenciales de manejo para aplicar MSEC. Sin embargo, la aplicación de la CE_a en MSEC puede mostrar relaciones débiles e inconsistentes con las características del suelo (Corwin *et al.*, 2003; Sudduth *et al.*, 2005). Estas relaciones inconsistentes pueden ser dadas por complejas interacciones entre la CE_a y algunas propiedades del suelo. Por lo tanto, es necesario entender cuáles son los factores o propiedades del suelo que influyen de manera significativa la variación de la CE_a para caracterizar la variabilidad espacial del suelo para aplicar la tecnología MSEC.

El objetivo de este trabajo fue evaluar si (i) la medición georeferenciada de la CE_a es un potencial estimador de las propiedades de suelo (arcilla, limo, arena, MO, pH, y CE_{ext}) y nutrientes ($N-NO_3^-$, $S-SO_4^{-2}$ y P); (ii) si la CE_a permite delimitar zonas potenciales de manejo en lotes de producción del Sudeste de Córdoba. Esta información puede ser esencial para utilizar exitosamente la medición georeferenciada de la CE_a para la delimitación de áreas de producción o zonas de manejo para permitir que los productores puedan aplicar la tecnología MSEC. Logrando así, aumentar la eficiencia en el uso de insumos, mejorar la sustentabilidad de la empresa, la protección del medio ambiente y el beneficio económico al productor (Dinnes *et al.*, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

El mapeo de la CE_a y los muestreos de suelo fueron realizados en julio de 2009, previo a la siembra del cultivo de trigo (*Triticum aestivum*). Para este trabajo se seleccionaron 2 lotes ubicados en el sur de la provincia de Córdoba, próximo a la localidad de Canals, denominados: F1 (38 ha) y F2 (20 ha) (Fig. 1). Los 2 lotes son cultivados bajo el sistema de siembra directa desde el 2002, con un sistema de rotación soja (*Soybean*)-maíz (*Zea mays*) para cultivos de verano y en la estación de invierno con trigo (*Triticum aestivum*), como cobertura. Los suelos predominantes a escala de lote son Haplustoles Udortenticos en las posiciones bajas de la toposecuencia y Haplustoles Enticos en las lomas y pie de lomas (Tabla 1 y Tabla 2). El clima de esta región es caracterizado por un régimen térmico con una temperatura media anual de 17 °C y una amplitud de 14 °C. Las precipitaciones anuales promedio son de 871 mm y la distribución estacional es monzónica (Ghida Daza *et al.*, 2009). Los dos lotes se encuentran dentro de la misma zona geográ-

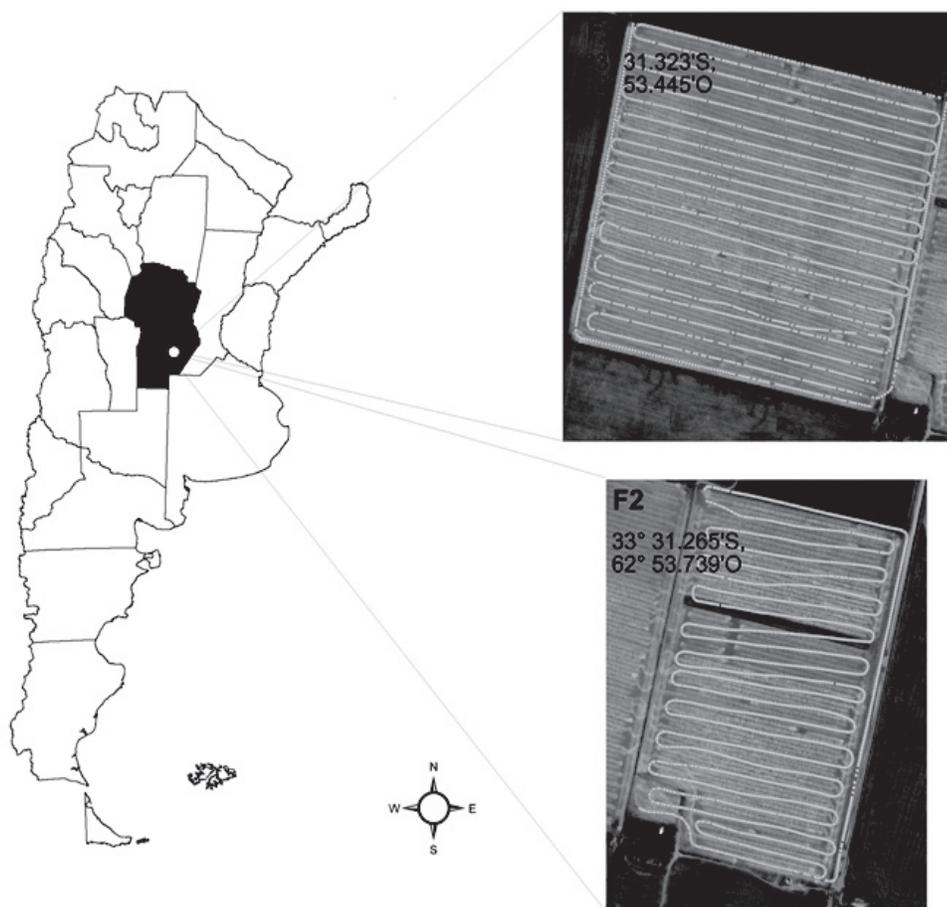


Figura 1. Sitios experimentales (lotes) ubicados en el Sudeste de Córdoba, departamento La Unión. Los puntos blancos dentro de cada lote, representan las medidas de la conductividad eléctrica aparente (CE_a).

Figure 1. Experimental sites (fields) located in Southeast Córdoba, La Union department. White points in each field represent apparent electrical conductivity (CE_a) sample points.

Tabla 1. Clasificación de suelo.

Table 1. Soil classification.

Serie de suelo	Tipo de suelo
Canals	Haplustol éntico - Franco gruesa, mixta, térmica
Alejo Ledesma	Haplustol udorténtico - Franco gruesa, mixta, térmica

INTA (1986). Mapa de suelos de la provincia de Córdoba (1:50000). Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. (USDA-Soil Taxonomy V.2006).

Tabla 2. Profundidad y granulometría de cada horizonte de suelo (INTA, 1986).

Table 2. Depth and size distribution of each soil horizon.

Clasificación del suelo	Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
Haplustol éntico	A	0 - 25	10,8	19,8	69,4
	AC	25 - 54	6,4	21,6	72
	C	54 a +	3,3	17,7	79
Haplustol udorténtico	A	0 - 23	15,7	11,5	72,8
	AC	23 - 63	11,5	34	54,5
	C	63 a +	7,2	49,9	42,9

fica, y representan esencialmente dos repeticiones en el espacio de esta región. Los lotes prestan escasa ondulación con una pendiente promedio para el lote F1 y F2 de 0,89 y 1,08%, respectivamente.

Mapeo de la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_a)

En cada lote, la medición de la CE_a se realizó utilizando el Veris 3100® (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS). El Veris es un dispositivo de contacto (los electrodos están en contacto con la superficie del suelo), consta de 6 electrodos de metal en forma de discos que penetran aproximadamente 5 cm en el suelo (Fig. 2). Los dos discos centrales emiten una corriente eléctrica continua y simultáneamente los otros dos pares de electrodos detectan el gradiente de corriente, dado por transmisión a través del suelo (resistencia). Los dos discos centrales miden la CE_a de 0 a 30 cm de profundidad; mientras que los dos discos extremos miden la CE_a de 0 a 90 cm. El Data Logger del Veris realiza la conversión de resistencia a conductividad ($1/resistencia = conductividad$). Para la elaboración de los mapas de CE_a , se utilizó la CE_a 0-30 cm (llamada CE_{a0-30}), coincidente con la profundidad de los muestreos de suelo georeferenciados. La unidad Veris fue traccionada por una pick-up y simultáneamente fue midiendo y georeferenciando la CE_a con un GPS diferencial (Trimble 132, Trimble Navigation Limited, USA) con una precisión de medición submétrica y configurado para tomar posición satelital cada 1-s. Cada lote se recorrió en dirección a los surcos de siembra en transectas paralelas distanciadas entre 15-20 m porque mayores a 20 m generan errores de medición y pérdida de información (Farahani *et al.*, 2007). La velocidad promedio de avance tuvo un rango entre 15 y 20 km h^{-1} .

Clases de Conductividad Eléctrica aparente y determinación de los puntos de muestreo

El muestreo de suelo realizado fue por zonas, en función de tres clases de CE_a . Investigaciones previas en diferentes suelos recomiendan la división en tres clases para la delimitación de zonas homogéneas de manejo porque muy poca información es obtenida usando un número mayor de clases (Fleming *et al.*, 2000; Peralta *et al.*, 2012). Los valores y amplitud de las clases de CE_a se clasificaron en cuantiles (cuartiles) de áreas iguales usando el Geostatistical Analyst en ArcGIS 9.3.1.

Los puntos de muestreo fueron centrados dentro de las distintas zonas de CE_a para evitar las zonas de transición. El valor promedio de la CE_a se determinó dentro de un diámetro de 20 m del punto de muestreo. La herramienta «Buffer» del ArcGIS 9.3.1 (Environmental System Research Institute, Redlands, CA) se utilizó para crear el diámetro de 20 m y obtener el valor promedio de la CE_a . Esta forma de determinar el muestreo tiene como objetivo obtener datos del análisis de suelo que abarquen toda la amplitud de la variabilidad espacial de la CE_a , a fin de obtener fiables correlaciones entre variables.

Muestreo y análisis de suelo

El muestreo se realizó con el muestreador a una profundidad de 30 cm guiado a dichos puntos manualmente con un GPS Juno (Trimble Navigation Limited, USA). Las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 60 °C con circulación forzada de aire por un tiempo de 10 a 16 horas, dependiendo de la humedad de la muestra. Se molieron y tamizaron por una malla de 2mm. Posteriormente, se determinó la distribución del tamaño de partículas por el método de Bouyoucos (Dewis &



Figura 2. Vista trasera del veris 3100 para las determinaciones de CE_a en posición de trabajo.

Figure 2. Rear end view of the Veris 3100 coulter-based apparent soil electrical conductivity sensor.

Freitas, 1970), el contenido de MO por el método de digestión húmeda de Walkley & Black (1934), el pH y la Conductividad Eléctrica del extracto a Saturación (CE_{ext} , ds/m) en relación 1:2,5 (suelo-agua). El contenido de $N-NO_3^-$ fue determinado por método colorimétrico de ácido 2,4 fenoldisulfónico (Bremner, 1965). El contenido de P y $S-SO_4^{2-}$ fueron cuantificados por extracción de la solución del suelo con el extractante de Mehlich-3 (Mehlich, 1984) y analizados con Perkin Elmer Plasma System (PerkinElmer, Wellesley, MA).

Variabilidad espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_a)

La correlación espacial de la CE_a fue cuantificada con semivariogramas (Ec. 1). El semivariograma es una función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés (CE_a) y fue estimado utilizando la ecuación (Isaaks *et al.*, 1989):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

donde; $\gamma^*(h)$ = valor del semivariograma en intervalos de distancia h ; $z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto x_i , en el cual hay datos x_i y $x_i + h$; $N(h)$ es el número total de pares de puntos dentro del intervalo de distancia. El semivariograma muestra la degradación de la correlación espacial entre dos puntos en el espacio, cuando la distancia de separación incrementa. En Samper y Carrera (1990) se presenta una discusión respecto a las características y condiciones que éstos deben cumplir. El mejor modelo de semivariograma que se ajustó a la estructura espacial de la CE_a fue el esférico (Peralta *et al.*, 2013). Para la clasificación de la estructura espacial de la CE_a se utilizó la relación meseta parcial: pepita (*parcial sill: nugget*), i.e. proporción de varianza explicada por el modelo respecto a la varianza total ($C_1/(C_0 + C_1)$), adoptando tres clases propuestas por Cambardella *et al.* (1994): fuerte ($> 0,75$), moderada (0,25-0,75), y débil ($< 0,25$).

Posteriormente, se procedió a la interpolación de los datos de CE_a con el procedimiento *kriging* ordinario, el cual cuantifica la estructura espacial de los datos usando los semivariogramas y los predice estadísticamente asumiendo que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que disminuye conforme se aleja del punto de interés (Bullock *et al.*, 2002). El valor interpolado con este método carece de sesgo (ya que la interpolación de las variables en un punto medido devuelve el valor de la variable en ese punto con un error de estimación nulo) (Vieira, 2000).

Análisis estadístico

Para evaluar si la medición georeferenciada de la CE_a permite delimitar áreas homogéneas dentro de los lotes, comparamos las diferencias en los promedios de las propiedades del suelo (arcilla, A_c ; limo, L ; arena, A_s ; MO; pH; y CE_{ext}) y nutrientes (P, $N-NO_3^-$; $S-SO_4^{2-}$) en las diferentes clases de CE_a utilizando el ANOVA de PROC MIXED (SAS Institute, 2002), con las clases de CE_a como efectos fijos, los lotes como efecto aleatorios y los puntos de muestreo dentro de cada clase de CE_a como una repetición (Littell *et al.*, 1996). Se realizó la comparación de medias de las propiedades del suelo con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$, utilizando el procedimiento LS-MEANS (SAS Institute, 2002). Analizamos cada lote como una localidad, cada clase de CE_a como un tratamiento en un diseño en bloques completo aleatorizado. Se calcularon estadísticos descriptivos para las propiedades del suelo por medio del procedimiento MEANS (SAS Institute, 2002) y regresiones simples entre las propiedades del suelo- CE_a utilizando el procedimiento CORR (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estructural de la CE_a

La dependencia espacial de la CE_a disminuyó progresivamente (equivalente a un incremento en la semivarianza) con la distancia. La CE_a mostró mayores rangos de dependencia espacial en el lote F2 que en F1, y la CE_{0-90} presentó una mayor correlación espacial que la CE_{0-30} (Tabla 3). La diferencia en la distancia de los rangos, se puede observar en el tamaño de las zonas homogéneas de los mapas de CE_a , donde las zonas más grandes se encuentran en el mapa de CE_{0-90} (Fig. 3).

La similitud en los patrones espaciales de las mediciones de CE_a en ambos estratos (0-30 y 0-90) (Fig. 3), es atribuible a que la variabilidad espacial es debida a características inherentes al suelo del área de estudio (Sudduth *et al.* 2001; Sudduth *et al.* 2003).

Acordando a la clasificación propuesta por Cambardella *et al.* (1994), la dependencia espacial de la CE_a dentro de cada lote puede ser considerada moderada a fuerte ($(C_1/(C_0 + C_1) > 0,5)$), significando que los modelos fueron explicados principalmente por la variabilidad espacial y no por errores de muestreo (Chang *et al.*, 1999).

Tabla 3. Parámetros de los modelos de los semivariogramas para la conductividad eléctrica aparente (CE_a) en cada lote.
 Table 3. Parameters of the semivariogram models for apparent electrical conductivity (CE_a) at each field.

Lote	CE_a	Modelo	Co	C1	C1/ (Co+C1)	Rango (m)
F1	CE_{0-30}	Esférico	21	51	0,71	80
	CE_{0-90}	Esférico	30	90	0,75	100
F2	CE_{0-30}	Esférico	28	75	0,73	100
	CE_{0-90}	Esférico	98	300	0,75	120

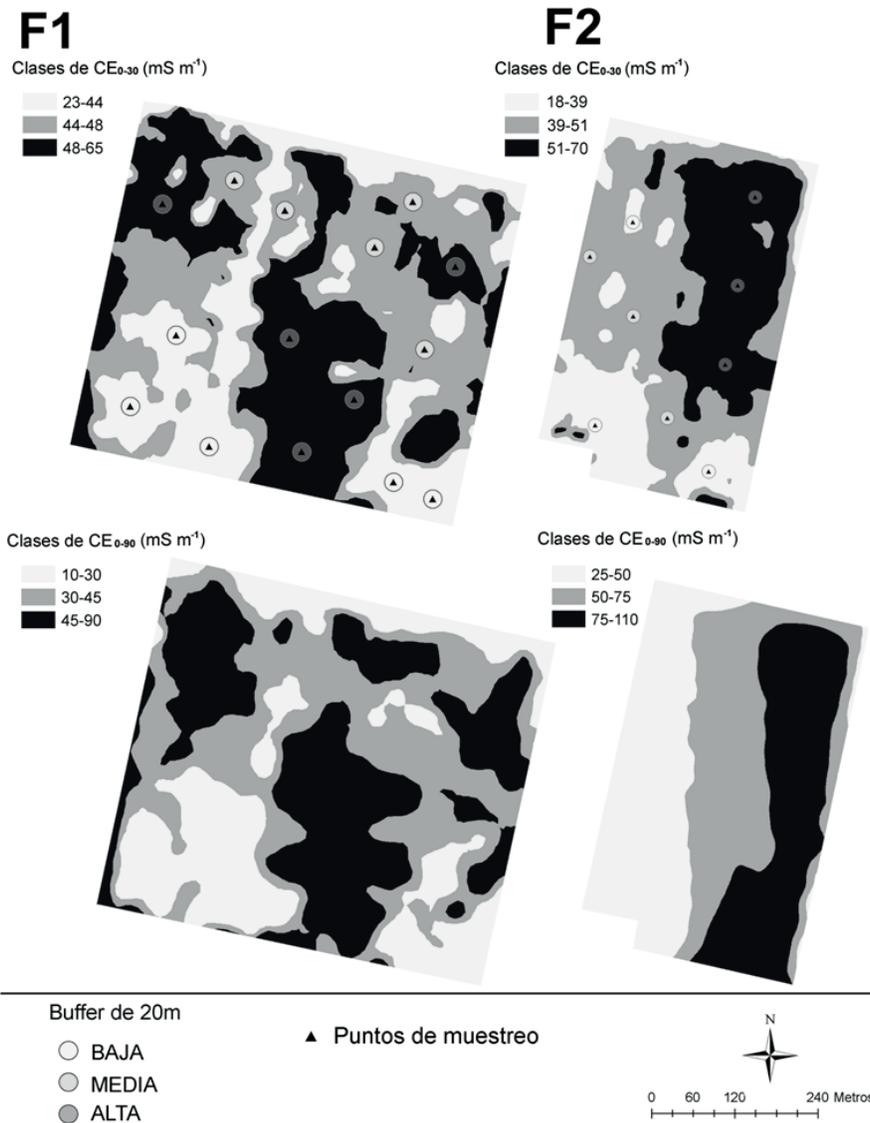


Figura 3. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CE_a) para cada lote.
 Figure 3. Apparent electrical conductivity (CE_a) map for each field.

Estadísticos descriptivos de la CE_a y propiedades del suelo

El análisis estadístico descriptivo se realizó para conocer la variación de la CE_a , propiedades de suelo y nutrientes (Tabla 4). La CE_a promedio para el lote F1 y F2 fue de 47,22 ($mS\ m^{-1}$) y 45,17 ($mS\ m^{-1}$), respectivamente. Valores similares de CE_a entre lotes es atribuible a que están compuestos por los mismos tipos de suelo (Shaner *et al.*, 2008). Peralta *et al.* (2013), mencionó que diferencias en los valores promedios de la CE_a , están asociados a diferentes tipos de suelo, principalmente por la diferencia en el tamaño de partículas del suelo. El CV para el lote F1 y F2 fue de 27,56 y 30,53%, respectivamente. La variación en la CE_a confirma la posibilidad de utilizarla para detectar la variabilidad del suelo, como ya ha sido ampliamente comprobada en diferentes localidades de otros países (Corwin *et al.*, 2006; Moral *et al.*, 2010).

El criterio sugerido por Wilding *et al.* (1994) fue utilizado para caracterizar la magnitud de la variabilidad de las propiedades del suelo y nutrientes, con un coeficiente de variación (CV) de 0 a 15, 15 a 30 y 35 a 100% caracteri-

zando variabilidad baja, media y alta, respectivamente. Todas las propiedades de suelo y nutrientes presentaron variabilidad media a alta, excepto el pH del suelo (Tabla 4). Estos resultados se encuentran dentro de los CV reportados en la bibliografía. Alesso *et al.* (2012) en un estudio de macro parcelas obtuvieron un CV inferior a < 5% para el pH del suelo. La concentración de P presentó un CV > 35% para ambos lotes. En los últimos 10 años, el sistema de labranza fue siembra directa y la aplicación de P para cubrir los requerimientos de los cultivos se realizó en bandas. El P residual en las bandas de aplicación genera amplia variación (Kitchen *et al.*, 1990; Mallarino *et al.*, 1996), ya que no es homogéneamente aplicado en todo el lote. La variación en las propiedades del suelo y nutrientes, es un indicador que el manejo uniforme dentro de los lotes, puede ser ineficiente (Corwin *et al.*, 2003).

Correlación entre la CE_a y las propiedades del suelo

El análisis de correlación simple, es utilizado para analizar los datos de la CE_a en la Agricultura de Precisión para

Tabla 4. Valor promedio (Prom.), coeficiente de variación (CV), mínimo (Min) y máximo (Max) de las propiedades de suelo y nutrientes para cada lote.

Tabla 4. Average values (Prom.), coefficient of variation (CV), minimum (Min) and maximum (Max) values of soil properties and nutrients at each field.

Lote	Variable	Prom.	CV	Mín	Máx
F1	CE_a ($mS\ m^{-1}$)	47,22	27,56	23	65
	A_c (%)	3,84	28,32	0,1	9,5
	L_i (%)	52,59	22,38	33,6	66,2
	$A_c + L_i$ (%)	56,43	24,05	33,7	74,2
	A_s (%)	43,57	31,15	25,8	66,3
	MO (%)	2,18	19,55	1,5	3,21
	pH	5,87	4,95	5	6,16
	CE_{ext} ($ds\ m^{-1}$)	0,1	37,23	0,04	0,18
	P ($mg\ kg^{-1}$)	11,06	35,51	6,94	19,23
	N- NO_3^- ($mg\ kg^{-1}$)	15,23	26,16	9,78	41,09
S- SO_4^{2-} ($mg\ kg^{-1}$)	15,46	19,1	21,13	48,36	
F2	CE_a ($mS\ m^{-1}$)	45,17	30,53	18	70
	A_c (%)	6,42	32,19	3,56	8,86
	L_i (%)	42,74	21,18	34,2	49,35
	$A_c + L_i$ (%)	49,16	24,51	40,21	58,21
	A_s (%)	50,84	16,06	41,79	59,79
	MO (%)	2,25	16,01	1,84	2,89
	pH	6,1	4,33	5,64	6,39
	CE_{ext} ($ds\ m^{-1}$)	0,1	17,04	0,08	0,13
	P ($mg\ kg^{-1}$)	13,3	35,44	7,37	19,8
	N- NO_3^- ($mg\ kg^{-1}$)	6,94	23,12	4	13,6
S- SO_4^{2-} ($mg\ kg^{-1}$)	11,46	18,8	9	16,04	

CE_a : Conductividad Eléctrica Aparente; A_c : arcilla; L_i : limo; A_s : arena; P: Fósforo Bray; CE_{ext} : Conductividad Eléctrica del extracto a saturación.

determinar el factor predominante del suelo que influye sobre la CE_a dentro del lote (Corwin *et al.*, 2003; Kitchen *et al.*, 2003). Los contenidos de partículas finas (A_c+L_1), gruesa (A_r) y la MO fueron las propiedades del suelo que presentaron correlaciones altamente significativas ($p < 0,001$, Tabla 5) en cada lote. El contenido de partículas finas estuvo correlacionado positivamente con la CE_a (Tabla 5). La conducción de la electricidad en los suelos se realiza principalmente a través de macro y micro-poros continuos y llenos de agua entre partículas de suelo. Los suelos con mayor porcentaje de partículas finas tienen un importante contacto partícula-partícula y mayor número de poros pequeños que retienen agua con mayor fuerza y por más tiempo, por lo que permiten conducir mejor la electricidad (Rhoades *et al.*, 1989), comparado con los suelos que tiene mayor contenido de partículas de arena (Farahani *et al.*, 2007; Shaner *et al.*, 2008;). La relación positiva entre CE_a y contenido de partículas finas es consistente con previos estudios (Sudduth *et al.*, 2003; Corwin *et al.*, 2006). Además, los contenidos de partículas finas estuvieron asociados positivamente con el contenido de MO del suelo (0,71; $p < 0,001$). Algunos componentes de la MO son mayormente responsables de la formación y estabilización de los agregados del suelo, generando poros y macroporos con-

tinuos (Lal, 2004), aumentando la capacidad de conducir la corriente eléctrica del suelo. Martínez *et al.*, (2009), explicaron que la fuerte correlación entre la CE_a - MO es debido a que la MO juega un rol significativo en el mantenimiento de las propiedades físicas del suelo y, que la MO está asociada a una acumulación de nutrientes y retención de agua, factores que tienen relación directa con la CE_a .

La relación entre CE_a con la CE_{ext} y el pH del suelo, fueron débilmente significativas y positivas (Tabla 5). Las relaciones halladas por otros autores, en suelos no-salinos generalmente son bajas e inconsistentes (Peralta, com. pers.; Johnson *et al.*, 2001). Mientras que en suelos salinos la variabilidad espacial de la concentración de sales es el principal factor del suelo que afecta a la medición de la CE_a (Corwin *et al.*, 2005).

Las concentraciones de los aniones ($N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$) no mostraron una asociación con la CE_a , excepto el $S-SO_4^{2-}$ en el lote F1 (Tabla 5). La escasa correlación probablemente es porque otros aniones pueden estar dominando a la medición de la CE_a (Johnson *et al.*, 2001; Fox, 2004). Zhang *et al.*, (2002) y Corwin *et al.*, (2005) encontraron fuertes correlaciones entre la CE_a - $N-NO_3^-$ y CE_a - $S-SO_4^{2-}$, trabajando en suelos con mayores concentraciones y variacio-

Tabla 5. Correlación (r) entre la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_a), propiedades del suelo y nutrientes para cada lote.
Table 5. Correlations (r) between apparent electrical conductivity (CE_a), soil properties and nutrients at each field.

Lote		CE_a	A_c+L_1	A_r	MO	pH	CE_{ext}	P	$N-NO_3^-$	$S-SO_4^{2-}$
F1	CE_a	1								
	A_c+L_1	0,88***	1							
	A_r	-0,76***	-1	1						
	MO	0,82***	0,71***	-0,71***	1					
	pH	0,43**	0,32*	ns	0,41*	1				
	CE_{ext}	0,51*	ns	ns	ns	0,74***	1			
	P	-0,55**	-0,56**	0,56**	-0,35*	-0,38*	ns	1		
	$N-NO_3^-$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1	
	$S-SO_4^{2-}$	ns	0,47*	-0,47**	0,81***	0,49*	ns	ns	ns	1
	F2	CE_a	1							
A_c+L_1		0,85***	1							
A_r		-0,65***	-1	1						
MO		0,61***	0,68***	-0,68***	1					
pH		0,42*	0,48*	-0,48*	0,67**	1				
CE_{ext}		ns	ns	ns	ns	ns	1			
P		-0,39*	ns	ns	ns	ns	ns	1		
$N-NO_3^-$		ns	-0,47	0,47*	-0,42*	ns	ns	ns	1	
$S-SO_4^{2-}$		ns	ns	ns	0,35*	ns	ns	ns	ns	1

Nivel de significancia: *, **, ***, $p < 0,05$; 0,01; 0,001, respectivamente. ns, diferencias no significativo.

CE_a : Conductividad Eléctrica Aparente; A_c : arcilla; L_1 : limo; A_r : arena; P: Fósforo Bray; CE_{ext} : Conductividad Eléctrica del extracto a saturación.

nes. El contenido de P presentó correlación negativa y significativa con la CE_a (Tabla 5). La identificación de correlaciones mayores a 0,6 indican que la CE_a puede ser utilizada exitosamente para estimar la variabilidad de las propiedades de suelo y nutrientes (Heiniger *et al.*, 2003). Como se ha visto, la CE_a mostró fuertes asociaciones ($r > 0,6$) con las partículas finas ($A_c + L_f$), gruesas (A_r), contenido de MO, y, en menor medida con la CE_{ext} , pH y el contenido de P. Mientras que la CE_a no estuvo correlacionada con los contenidos de $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$.

Delimitación de zonas potenciales

Para evaluar si la medición georeferenciada de la CE_a permite delimitar zonas homogéneas dentro de los lotes, comparamos los promedios de las propiedades del suelo y nutrientes en las clases de CE_a utilizando el ANOVA de PROC MIXED. Todas las propiedades del suelo (A_c , L_f , A_r , MO, pH, y CE_{ext}) y nutrientes (P , $N-NO_3^-$, $S-SO_4^{2-}$) presentaron interacción entre localidad (lotes) y clases de CE_a ($p \leq 0,05$, Tabla 6), por lo tanto, analizamos el comportamiento de estas variables por lote. El contenido de A_r y partículas finas presentaron diferencias significativas entre las clases de CE_a en cada lote. El contenido de partículas finas y A_r presentaron diferencias en tres clases de CE_a , excepto la A_r en F2, donde no hubo diferencias entre las clases media-alta. Investigaciones previas, reportaron que la CE_a es influenciada por el contenido de partículas finas y A_r , lo que refleja la capacidad de retención de agua del suelo, y por lo tanto, la variación espacial del rendimiento de grano de los cultivos (Herber, 2011). El porcentaje de MO del suelo presentó la misma tendencia que las partículas finas, pero con menores diferencias entre clases de CE_a (Tabla 6). La clase baja de CE_a estuvo asociada a áreas del lote con mayores contenidos de partículas finas y MO;

y la clase alta de CE_a asociada a contenidos altos de arena y bajos de MO. Estos resultados son debido a que las partículas finas estuvieron relacionadas positivamente al contenido de MO (Tabla 5) (Peralta *et al.*, 2013). Al aumentar la capacidad de retención de agua de los suelos, producto de partículas de suelo más finas, se incrementa su contenido de MO como consecuencia del mayor aporte de residuos que reciben y por el efecto protector de las partículas finas sobre la MO (Parton *et al.*, 1993). La CE_{ext} y pH solamente exhibieron diferencias significativas en la clase alta de CE_a , excepto el pH en F1 que no presentó diferencias significativas (Tabla 4). Los mayores valores de estas propiedades de suelo estuvieron asociados a la clase alta de CE_a ; y viceversa. Peralta *et al.*, 2012, informó que para suelos del Sudeste Bonaerense, sin problemas de salinidad, el contenido de sales y pH no son propiedades de suelo que afecten significativamente a la variabilidad de la CE_a .

Por otra parte, las concentraciones de los aniones ($N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$) no mostraron diferencias significativas entre clases de CE_a (Tabla 6), haciendo difícil la separación de zonas porque la transformación en el suelo de estos nutrientes es controlada por el contenido de humedad, actividad biológica, composición y cantidad de materia orgánica. Estas características del suelo impactan sobre los procesos de inmovilización y lavado o mineralización que definen los niveles de $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$ en el suelo (Stevenson, 1982; Ericksen, 1997a). En contraste, el contenido de P mostró diferencias significativas entre clases de CE_a (Tabla 6), encontrando los mayores contenidos de P en la clase baja de CE_a ; y viceversa. Las zonas bajas de CE_a están asociadas a las zonas con lomas arenosas (Haplustoles Énticos) de baja capacidad de retención de hídrica (Urricariet *et al.*, 2011) y MO, generando zonas de bajos potenciales de rendimiento, y por ende, de baja extracción de P. Mien-

Tabla 6. Promedio de las propiedades del suelo y nutrientes para las diferentes clases de Conductividad Eléctrica Aparente (CE_a).

Table 6. Soil properties and nutrient means for different classes of apparent electrical conductivity (CE_a) at each field.

Lote	Clase CE_a	A_c (%)	L_f (%)	A_r (%)	$A_c + L_f$ (%)	MO (%)	pH	CE_{ext} (dS m ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	NO_3^- -N (mg kg ⁻¹)	SO_4^{2-} -S (mg kg ⁻¹)
F1	Baja	1,64 b	38,51 b	59,86 a	40,14 c	1,59 c	5,77	0,09 b	13,35 a	12,29	32,06
	Media	2,46 b	57,88 a	39,66 b	60,34 b	1,99 b	5,85	0,08 b	10,07 b	18,48	34,52
	Alta	7,42 a	61,41 a	31,18 c	68,82 a	2,64 a	5,99	0,13 a	9,74 b	14,9	35,80
F2	Baja	6,18	36,58 b	57,23 a	42,77 c	1,81 b	6,05 b	0,08 b	13,61 a	6,41	11,86
	Media	5,32	45,74 a	48,93 b	51,07 b	2,29 a	5,93 b	0,10 b	16,45 a	8,24	11,80
	Alta	7,76	45,88 a	46,36 b	56,64 a	2,38 a	6,31 a	0,14 a	9,84 b	6,17	10,71

A_c : arcilla; L_f : limo; A_r : arena; P: Fósforo Bray; CE_{ext} : Conductividad Eléctrica del extracto a saturación.

tras que la clase alta de CE_a estuvo asociada a zonas bajas del terreno, con mayor fertilidad potencial y rendimiento, generando zonas con una historia extractiva de P. Bermúdez (2011), observó en lotes del Oeste Bonaerense, lomas arenosas con 20-22 ppm, mientras que las zonas bajas del lote (con mayores contenidos de partículas finas) presentaron 12-14 ppm.

Esta posibilidad de detectar la variabilidad del suelo, utilizando la CE_a provee una base efectiva para delimitar propiedades o atributos del suelo que están interrelacionados y ofrece un marco de trabajo muy útil para el muestreo de suelo, reflejando la heterogeneidad espacial (Moral *et al.*, 2010; Peralta *et al.*, 2012).

CONCLUSIÓN

El contenido de partículas finas ($A_c + L_f$), A_p , MO, P y los valores de pH fueron las propiedades del suelo que presentaron correlaciones significativas con la medición georeferenciada de la CE_a . En consecuencia, la CE_a es un potencial estimador de la variabilidad espacial de estas propiedades del suelo. Mientras que la CE_{ext} , los contenidos de $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$ presentaron correlaciones débiles e inconsistentes con la CE_a , convirtiéndose la CE_a en un débil estimador de dichas propiedades.

Considerando que la CE_a permite caracterizar la variabilidad espacial de los contenidos de partículas finas ($A_c + L_f$), las cuales son estables en el tiempo y están relacionados a la fertilidad físico-química de los suelos; estos resultados sugieren que los mapas de CE_a , tienen un potencial para delimitar tres zonas de MSEC y diseñar un muestreo por zonas, logrando disminuir los costos de muestreo sin perder información de la variabilidad espacial de los suelos.

La aplicación de dosis variables de insumos, ya sea de fertilizante y/o semilla, puede ser llevada a cabo, disminuyendo los insumos en la zona menos productiva (clase baja de CE_a —asociada a altos contenidos de arena y baja capacidad de retención de agua—), como una estrategia para aumentar la eficiencia en el uso de insumos, y el beneficio económico al productor, comparado con el manejo uniforme de los lotes (Dinnes *et al.*, 2002). Además, se pueden realizar otros estudios para comparar este propósito de delimitar zonas de manejo, con mapas de rendimiento para comprender mejor la importancia agronómica de esta clasificación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los Ing. Agr. Julián Muguerza y Sebastián Storti y, a la Aceitera General Deheza por su ayuda en la recopilación de los datos en los lotes donde se realizó el estudio. Además, queremos agradecerle al programa de becas de posgrado del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); Proyecto de INTA, Desarrollo y Aplicación de la Tecnología de Agricultura de Precisión para el Manejo de Cultivos (AEAI3722), y a los dos revisores que con sus sugerencias permitieron mejorar sustancialmente el trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, CA; MA Pilatti; SC Imhoff & M Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del Suelo* 30(1): 85-93.
- Bermúdez, M. 2011. Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. Simposio de fertilidad Pp. 47-54.
- Bullock, DS; N Kitchen & DG Bullock. 2007. Multidisciplinary Teams: A Necessity for Research in Precision Agriculture *Systems Crop Sci.* 47: 1765-1769.
- Cambardella, CA; TB Moorman; JM Novak, TB Parkin; RF Karlen & AE Konopka. 1994. Field scale variability in central Iowa soils *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
- Chang, J; DE Clay; CG Carlson & S Clay. 1999. Precision farming protocols: Part 1. Grid distance and soil nutrient impact on the reproducibility of spatial variability measurements. *Precis. Agric.* 1: 227-289.
- Corwin, DL; SM Lesch; PJ Shouse; R Soppe & JE Ayars. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95(2): 352-364.
- Corwin, DL; SM Lesch; JD Oster & SR Kaffka. 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity *Geoderma* 131: 369-387
- Corwin, DL & SM Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols *Computers Electronics Agric.* 46: 103-133.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2010. Delineating site-specific management units with proximal sensors. In: Oliver MO, editores. *Geostatistical applications for precision agriculture*. New York, NY: Springer. pp. 139-165.
- Dewis, J & F Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre Suelos N° 10 FAO: 252p.
- Dinnes, DL; DL Karlen; DB Jaynes; TC Kaspar; JL Hatfield; TS Colvin & CA Cambardella. 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agron. J.* 94: 153-171.
- Farahani, HJ & RL Flynn. 2007. Map quality & zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. *Precision Agric.* 96: 151-159.
- Fleming, KL; DG Westfall; DW Wiens & MC Brodah. 2000. Evaluating farmer developed management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agric.* 2: 201-215.

- Fox, ML. 2004. Identifying soils with potential of expanding sulfate mineral formation using electromagnetic induction. Thesis for Degree of Master of Sciencef Kansas State University.
- Ghida Daza, C & C Sánchez. 2009. Zonas agroeconómicas homogéneas Córdoba. Buenos Aires. INTA. Serie: Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales. n° 10; pp. 257.
- Heiniger, RW; RG McBride & DE Clay. 2003. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. *Agron. J.* 95: 508-519.
- Herber, L. 2011. Conductividad Eléctrica aparente como herramienta para delimitar Zonas de Manejo Sitio Específico en Maíz (*Zea mays*) en la Provincia de Corrientes. Tesis para el grado de Magister Scientiae. Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina.
- INTA. 1986. Carta de Suelos de la Republica Argentina – Hoja 3363-28 – Canals – Plan Mapa de Suelo – Córdoba. 31-32, escala 1:50.000.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York, NY: Oxford University Press. 561 p.
- Johnson, CK; JW Doran; BJ Wienhold & JF Shanahan. 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1829-1837.
- Kitchen, N; J Havlin & D Westfall. 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1661-1665.
- Kitchen, NR; ST Drummond; ED Lund & KA Sudduth. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agron. J.* 95: 483-495.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global change & food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Littell, RC; GA Milliken; WW Stroup & RD Wolfinger. 1996. SAS System for Mixed Models, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Mallarino, AP. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1473-1481.
- Mallarino, AP & DJ Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agric.* 5: 131-144.
- Martínez, G; K Verlinden; JV Giráldez; AJ Espejo; E Rodríguez; R Ordóñez & JL Muriel. 2009. Use of apparent electrical conductivity as secondary information for soil organic carbon spatial characterization. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol IX.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15(12): 1409-1416.
- Moral, FJ; JM Terrón & JR Marques da Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques *Soil Till. Res.* 106: 335-343.
- Parton, WJ; MO Scurlock; TG Ojima & TG Gilmanov. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide *Global Biochem. Cycles* 7: 785-809.
- Peralta, NR; M Castro Franco; L Herber; JL Costa. 2012. La conductividad eléctrica aparente: una herramienta para reducir la escala del mapa de suelos y delimitar zonas de manejo sitio-específico. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini; H Angelini. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the Southeastern Pampas. *Canadian Journal of Soil Science*. En prensa
- Pringle, MJ; AB McBratney; BM Whelan & JA Taylor. 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data. *Agr. Sys.* 76(1): 273-292.
- Rhoades, JD; NA Manteghi; PJ Shouse & WJ Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 433-439.
- Samper, F & J Carrera. 1990. Geoestadística. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 451 pp.
- Serrano, JM; JR Marques da Silva & S Shaidian. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers Electronics Agric.* 73: 7-16.
- Shaner, DL; MK Brodahl & GW Buchleiter. 2008. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? *Agron. J.* 100: 1472-1480.
- Stevenson, FJ. 1982. Origin and distribution of nitrogen in soil. In: FJ Stevenson (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Vol. 22 Pp. 1:42. Agron. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Sudduth, KA; ST Drummond & NR Kitchen. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers Electronics Agric.* 31: 239-264.
- Sudduth, KA; NR Kitchen; GA Bollero; DG Bullock & WJ Wiebold. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95: 472-482.
- Sudduth, KA; NR Kitchen; WJ Wiebold; WD Batchelor; GA Bollero; DG Bullock; DE Clay; HL Palm; FJ Pierce; RT Schuler & KD Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers Electronics Agric.* 46: 263-283.
- Terrón, JM; JR Marques da Silva; FJ Moral & A García-Ferrer. 2011. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agric.* 12: 750-761
- Urricariet, S; M Niborski & CM Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo* 29(1): 49- 59.
- Veris Technologies. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. [http:// www.veristech.com](http://www.veristech.com). Veris Technologies, Salina, KS. Accessed 25 June 2012.
- Vieira, SR. 2000. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. En: RF Novais (ed.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa. pp. 3-87. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An Examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 3: 29-37.
- Wilding, LP; J Bouma & DW Goss. 1994. Impact of spatial variability on interpretive modeling. p. 61.75. In: RB Bryant & RW Arnold (ed.) Quantitative modeling of soil forming processes. Publ. 39. SSSA, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Zhang, R & BJ Wienhold. 2002. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity & pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63: 251-254.