

IDENTIFICACIÓN DE SERIES DE SUELOS MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE EN EL SUDESTE BONAERENSE

MARIANO PAGGI¹; NAHUEL PERALTA^{1,2*}; MIRTA CALANDRONI¹; FABIÁN CABRIA¹; JOSÉ LUIS COSTA^{1,3}
& VIRGINIA APARICIO^{1,3}

Recibido: 06-03-13

Recibido con revisiones: 20-05-13

Aceptado: 26-05-13

RESUMEN

Durante el siglo pasado, se elaboraron mapas de suelo en la provincia de Buenos Aires a una escala de 1:50000. Por lo general, los lotes de producción del Sudeste Bonaerense contienen más de una unidad cartográfica con distintas series de suelo con diferentes aptitudes agrícolas. En los mapas a escala 1:50000, la ubicación precisa de estas series de suelo no siempre se logra identificar. La profundidad efectiva del perfil del suelo es un indicador de las series de suelo. El objetivo del presente trabajo fue: (I) examinar la estructura espacial de la CE_a (II) evaluar la relación espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente del suelo entre diferentes sensores (Geonics EM38-mk2 y Veris 3100); y (III) evaluar la relación espacial de la CE_a y la profundidad del suelo, como un indicador de la serie de suelo. Los muestreos se efectuaron en un lote de 16 ha ubicado en la EEA Balcarce. La medición de la CE_a fue realizada con un sensor de no-contacto (Geonics EM38-mk2) en la orientación dipolo vertical (0-150 cm de profundidad) midiendo la CE_a por inducción electromagnética, y un sensor de contacto (Veris 3100) (0-30 y 0-90 cm de profundidad). La profundidad del suelo fue medida a una distancia promedio entre puntos de muestreo de 25 m con un muestreador hidráulico (Giddings). Los datos colectados con el EM38-mk2 en la orientación dipolo vertical (0-150 cm de profundidad) y Veris 3100 (0-90 cm de profundidad) presentaron las mayores correlaciones espaciales ($r= 0,77$). La profundidad del suelo estuvo principalmente asociada a la CE_a superficial (0-30 cm) medida por el Veris 3100 ($r= -0,58$). La CE_a puede usarse como indicador de la serie de suelo en lotes que presenten variabilidad en su profundidad efectiva.

Palabras clave. Cartografía digital, profundidad de suelo, variabilidad espacial, Conductividad Eléctrica Aparente.

IDENTIFICATION OF SOIL SERIES WITH APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY SENSORS IN THE SOUTHEASTERN PAMPAS

ABSTRACT

During the last century, soil maps were developed in the province of Buenos Aires on a scale of 1:50000. Generally, fields in the Southeastern pampas contain more than one mapping unit composed of different soil series with several agricultural aptitudes. In the 1:50000 scale maps, the precise location of these soil series are not always successfully identified. The effective depth of the soil profile is an indicator of soil series. The objectives of this study were to: (I) examine the spatial structure of apparent electrical conductivity (EC_a), (II) evaluate the spatial relationship of soil EC_a between different sensors (Geonics EM38-mk2 and Veris 3100); and (III) to evaluate the spatial relationship of EC_a and soil depth, as an indicator of soil series. Sampling was carried out in a field of 16 ha, located in the EEA Balcarce. The measurement of EC_a was performed using a non-contact sensor (Geonics EM38-MK2) in a vertical dipole orientation (0-150 cm depth) and a contact sensor (Veris 3100) (0-30 and 0-90 cm depth). Soil depth was measured at an average distance between sampling points of 25 m with a Giddings hydraulic sampler. The highest spatial correlations ($r= -0.77$) were achieved with data collected with the EM38-mk2 (0-150 cm depth) and Veris 3100 (0-90 cm depth). Soil depth was mainly associated with surface EC_a (0-30 cm) measured by Veris 3100 ($r= -0.58$). Therefore, EC_a can be used as an indicator of the soil series in fields with depth variability.

Key words. Digital mapping, soil depth, spatial variability, apparent electrical conductivity.

¹ Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FCA-UNMdP);

² CONICET;

³ Estación Experimental INTA- Balcarce, C.C. 276 (7620) Balcarce, Argentina.

*Autor de contacto: nperalta@balcarce.inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del suelo, de sus características y aptitudes, así como de su distribución geográfica dentro de un área es fundamental para planificar su uso racionalmente. La finalidad de las cartas de suelos es divulgar conocimientos sobre las propiedades de los suelos, mostrar su distribución, clasificar el suelo de acuerdo a su aptitud de uso y dar a conocer las normas generales para su manejo y conservación (INTA, 2011). Durante el siglo pasado (década de los años '60 y '80), se condujeron estudios a escala nacional para la elaboración de mapas de suelo. En la provincia de Buenos Aires se realizaron a una escala de 1:50000, con el fin de apoyar el desarrollo agrícola (INTA, 2011).

Muchas de las características de los suelos varían dentro de las unidades cartográficas e ignorar esta variación reduce la utilidad y la fiabilidad de los mapas de suelo disponibles (Heuvelink & Webster, 2001). Por lo general, los lotes del Sudeste Bonaerense contienen más de una unidad cartográfica con distintas series de suelo de diferentes aptitudes. En los mapas a escala 1:50000, la ubicación precisa de estas series no siempre se logra identificar. Por lo tanto, para evaluar la variabilidad de los tipos de suelo a escala de lote, se pueden utilizar variables indicadoras que permiten la identificación de las series de suelos presentes (Vitharana *et al.*, 2008). La profundidad efectiva del perfil del suelo (PS), es decir, la profundidad de un horizonte petrocálcico (tosca) o de un manto lítico (roca), puede ser limitante para el crecimiento radicular y, en los lotes del sudeste bonaerense, es un indicador de las series de suelo presentes (Buschiazzo, 1986).

En un planteo de Agricultura de Precisión, la manera de mejorar un mapa de suelo es realizar un muestreo a una escala más detallada para obtener una mejor representación de la variabilidad espacial de sus propiedades (Dent & Young, 1981). Muestrear suelos a una mayor escala para obtener mapas precisos que sean de utilidad para la Agricultura de Precisión, puede resultar poco práctico, debido al alto costo de realización y el tiempo que implica (Shaner *et al.*, 2008). Por ende, es conveniente contar con métodos precisos y eficientes de medición de la variabilidad de las propiedades del suelo dentro de los lotes de producción (Sudduth *et al.*, 2003; Sudduth *et al.*, 2005). A los fines de mejorar la cartografía actual ó realizar un manejo sitio-específico del suelo, sería útil contar con otro método, además del muestreo tradicional, que sea rápido, preciso, de bajo costo y confiable para caracterizar la heterogeneidad del suelo dentro de los lotes de producción (Terrón *et al.*, 2011). Un método que está recibiendo mucha atención para realizar la caracterización de la heterogeneidad

es la medición georeferenciada de la Conductividad Eléctrica Aparente del suelo (CE_a) (Johnson *et al.*, 2001; Sudduth *et al.*, 2003; Corwin *et al.*, 2006), aunque pueden existir relaciones débiles o inconsistentes entre la CE_a y las características del suelo dependiendo del lote (Johnson *et al.*, 2001; Heiniger *et al.*, 2003; Peralta *et al.*, 2012a). De este modo, es necesario entender qué factores de suelo afectan significativamente la variación de la CE_a dentro de un lote (Bang, 2005). La CE_a es la medición *in situ* de la capacidad que tiene el suelo para conducir la corriente eléctrica (Doerge, 1999). La CE_a está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, tales como: la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, tipos de suelo, entre otras (Corwin & Lesch, 2005; Sudduth *et al.*, 2005; Peralta *et al.*, 2012a, 2012b). 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 (Sudduth *et al.*, 2001; Sudduth *et al.*, 2003; Farahani *et al.*, 2007). Entre otros usos de la CE_a en Agricultura de Precisión, se ha incluido el refinamiento de los límites de las unidades cartográficas de suelos (Fenton & Lauterbach, 1999; Peralta *et al.*, 2012b). Así, la medición georeferenciada de la CE_a podría convertirse en un estimador de la variabilidad espacial del suelo, y por lo tanto, de la productividad en un sitio determinado del lote (Corwin *et al.*, 2006).

Entre los sensores que efectúan la medición geoespacial de la CE_a pueden citarse el sensor de contacto con el suelo, Veris 3100® (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS) y el sensor de no-contacto con el suelo, EM38- mk2 (Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá) (Sudduth *et al.*, 2001).

Los objetivos de este trabajo fueron: (I) Examinar la estructura espacial de la CE_a ; (II) Evaluar la relación espacial entre la CE_a medida por el Veris 3100 (contacto) y el EM-38mk2 (no-contacto); (III) Evaluar la relación espacial de la CE_a y la profundidad del suelo, como un indicador de las series de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los muestreos se efectuaron en un lote de 16 ha, ubicado dentro de la EEA Balcarce (latitud 37°46'01" longitud 58°17'47") (Fig. 1). Los suelos predominantes de esta región

pertenecen al orden de los Molisoles, gran grupo Argiudoles ó Paleudoles desarrollados sobre sedimentos loésicos, bajo régimen údico-térmico (INTA, 1970).

El sitio experimental está constituido, según la carta de suelos correspondiente, por 3 Unidades Cartográficas (Tabla 1), en el cual aproximadamente el 65% de la superficie corresponde a Argiudol típico serie Mar del Plata, sin limitantes de profundidad, el 23% a Paleudol Petrocálcico serie Balcarce, con limitantes de profundidad entre 50 y 80 cm, y el resto corresponde a series de suelos con limitante de profundidad severa (Hapludoles y Argiudoles Líticos, menos de 50 cm) (INTA, 1970).

Medición de la profundidad efectiva del suelo (PS)

La medición se realizó usando un penetrómetro hidráulico Giddings y georreferenciando cada punto ($n=132$) con un GPS (Juno ST; Trimble Navigation Limited, USA) (Fig. 1b). La distancia promedio de separación entre los puntos fue de 25 m, la cual fue obtenida con la herramienta del estadístico espacial del ArcGis v9.3.1

Se tomó la variable profundidad efectiva como criterio para caracterizar la variabilidad espacial del área de estudio,

dado que es la propiedad de suelo más contrastante entre las distintas series de suelo presentes en el lote (INTA, 1970). Para describir la variabilidad espacial y elaborar los mapas de profundidad se establecieron rangos en base a la profundidad efectiva siguiendo como criterio el grado de limitante para los cultivos (Sadras & Calviño, 2001) (Tabla 2), que puede definir el tipo de suelo: los suelos de menos de 50 cm que afectan en gran medida el rendimiento de cualquier cultivo, tanto de invierno como de verano, corresponden a Hapludoles o Argiudoles líticos; suelos entre 50 y 150 cm que afectan de manera variable y significativa el rendimiento sobre todo de cultivos de verano (maíz y girasol) de acuerdo a su profundidad (Sadras & Calviño, 2001), corresponden a Paleudoles Petrocálcicos serie Balcarce (50 a 80 cm) y al menos a otra serie no clasificada (80 a 150 cm). Por último los suelos sin limitantes de profundidad que no afectan el rendimiento (más de 150 cm) corresponden a Argiudoles Típicos.

Medición de la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em})

En la recolección de datos se utilizó una pick-up a la cual fueron acoplados en tándem los equipos Veris 3100 y EM38-mk2 (Fig. 2). Las mediciones georreferenciadas de ambos

Tabla 1. Unidades cartográficas: Consociación Mar del Plata (MP) fase 3 y 4, y complejo Sierra de los Padres (SP 10).

Table 1. Mapping units: Mar del Plata (MP) consociation, phase 3 and 4, and Sierra de los Padres (SP 10) complex.

U.C.	Superficie del lote (%)	Serie de suelo	Clasificación
MP 3	58	Mar del Plata (80%)	Argiudol Típico
		Balcarce (20%)	Paleudol Petrocálcico
MP 4	27	Mar del Plata (70%)	Argiudol Típico
		Balcarce (30%)	Paleudol Petrocálcico
SP 10	15	Sierra de los padres (30%)	Hapludol Lítico
		La Alianza (20%)	Hapludol Lítico
		Cinco Cerros (30%)	Argiudol Lítico
		Balcarce (20%)	Paleudol Petrocálcico

U.C.: Unidad cartográfica.

Tabla 2. Rangos de profundidad del suelo (PS) utilizados para la caracterización del tipo de suelo.

Table 2. Soil depth ranges (PS) used for the characterization of soil type.

Rango de PS (cm)	Tipo de suelo
25 - 50	Hapludoles y Argiudoles Líticos
51 - 80	Paleudol Petrocálcico serie Balcarce
81 - 110	(serie no cartografiada)
111 - 150	(serie no cartografiada)
+ de 150	Argiudol Típico

sensores presentaron la misma ubicación geográfica (Fig. 1a). Este modo de operación fue empleado para minimizar las fuentes de variación que podrían afectar las lecturas de CE_a entre momentos diferentes de muestreo (Sudduth *et al.*, 2003).

La unidad Veris fue midiendo y georreferenciando la CE_a con un GPS diferencial (Trimble R3, Trimble Navigation Limited, USA) con una precisión de medición submétrica y configurado para tomar posición satelital cada 1s.

El equipo EM38-mk2 fue montado sobre un trineo no metálico especialmente diseñado y fabricado para este ex-

perimento. Se conectó vía bluetooth al GPS diferencial, y se calibró según las instrucciones del manual del usuario.

Para maniobrar fácilmente, los lotes se recorrieron en dirección a los surcos de siembra en transectas paralelas distanciadas entre 15 y 20 m (Fig. 1a) dado que distancias mayores a 20 m generan errores de estimación y pérdida de información (Farahani & Flynn, 2007). La velocidad promedio de avance tuvo un rango entre 15 y 20 $km\ h^{-1}$.

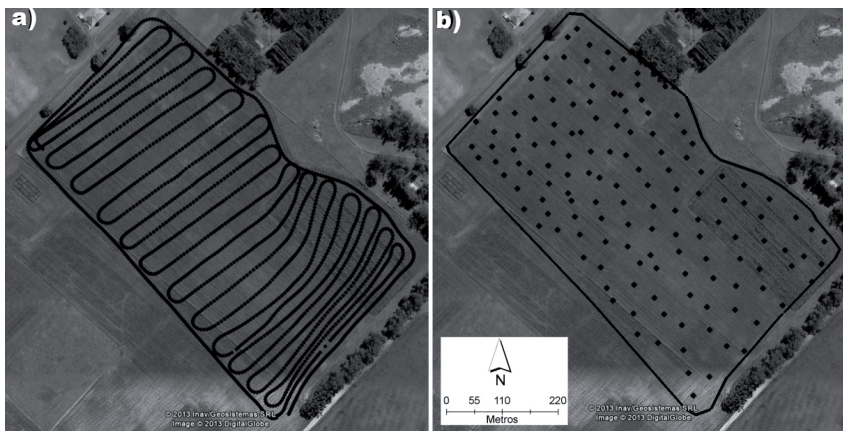


Figura 1. a) Transectas de los puntos de Conductividad Eléctrica Aparente del Veris 3100 y EM38-mk2, b) Puntos georreferenciados de la profundidad del suelo.

Figure 1. a) Transects points of apparent electrical conductivity (Veris 3100 y EM38-mk2), b) georeferenced points of soil depth.



Figura 2. Disposición en tándem de los equipos (Veris 3100 y EM38-mk2).

Figure 2. Tandem arrangement of equipment (Veris 3100 y EM38-mk2).

- Medición con el sensor de contacto Veris 3100

El Veris 3100 es un dispositivo de contacto, consta de 6 discos-electrodos que penetran aproximadamente 5 cm en el suelo. Dos discos emiten una corriente eléctrica continua y simultáneamente otros dos electrodos detectan la diferencia de potencial, dada por resistencia a través del suelo (Fig. 3). La profundidad de medición se basa en la distancia que hay entre los discos-electrodos emisores y receptores (equidistantes). El sistema está diseñado para trabajar en la configuración A (superficial: 0-30 cm de profundidad) y B (profunda: 0-90 cm de profundidad), simultáneamente. La configuración A está compuesta por los discos 2, 3, 4 y 5; la diferencia de potencial es medida entre los discos 3 y 4. En la configuración B, los discos 1, 2, 5, 6 integran la medición de resistencia y la diferencia de potencial es medida entre los discos 2 y 5. (Fig. 3). El <<Data Logger>> del Veris realiza la conversión de resistencia a conductividad (1/resistencia= conductividad) (Amin *et al.*, 2004).

- Medición con el sensor no-contacto EM38-mk2

Este instrumento utiliza la inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica aparente de una columna de suelo hasta una profundidad de observación específica (Sudduth *et al.*, 2001).

Una bobina emisora (E) emite una corriente alterna, generando un campo magnético primario oscilante (H_p) en sus proximidades. El campo magnético primario oscilante genera una variación en el flujo del campo magnético del suelo (medio conductor) que favorece la aparición de corrientes secundarias inducidas. Las corrientes secundarias (CS) generan en el suelo un campo magnético secundario (H_s). Una bobina receptora (R) capta ambos campos magnéticos H_p y H_s (Fig. 4). El cociente entre el campo magnético secundario (H_s) y primario (H_p) es linealmente proporcional a la CE_a del suelo (McNeill, 1980; Hendrickx & Kachanoski, 2002).

Respuesta de los sensores en función de la profundidad del suelo

La respuesta de los sensores a la conductividad del suelo varía con la profundidad del suelo. En el caso del EM38-mk2, la capacidad de percibir cambios en las propiedades de suelo es máxima a alrededor de 0,4 m y decrece gradualmente, mientras que las dos curvas del Veris 3100 alcanzan un máximo más cerca de la superficie del suelo y luego decrecen más rápidamente con la profundidad (Fig. 5).

La integración de las curvas de respuesta con respecto a la profundidad (respuesta acumulada) muestra claramente

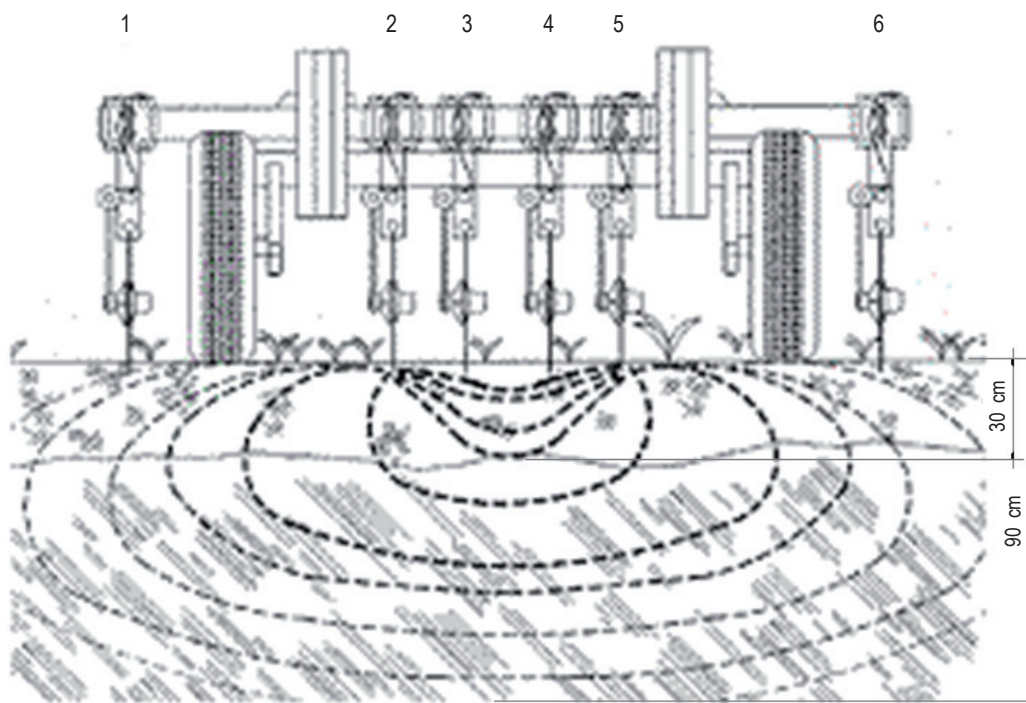


Figura 3. Esquema de la configuración A (superficial: 0-30 cm; CE_{v30}) y B (profunda: 0-90 cm; CE_{v90}) (Adaptado de Amin *et al.*, 2004).

Figure 3. Configuration scheme A (shallow: 0-30 cm; CE_{v30}) and B (deep: 0-90 cm; CE_{v90}) (Adapted from Amin *et al.*, 2004).

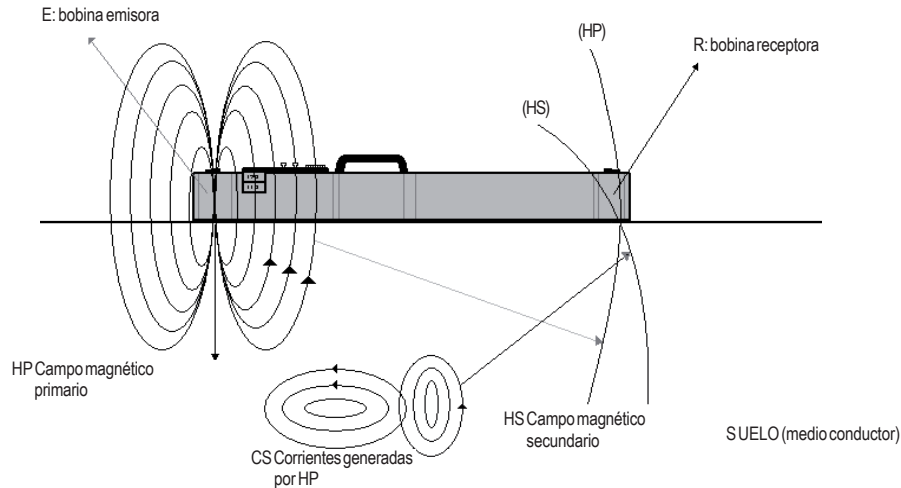


Figura 4. Esquema de funcionamiento del EM38-mk2: en modo vertical (Adaptado de Lesch *et al.*, 2005).

Figure 4. Operating scheme of EM38-mk2: vertical mode (Adapted from Lesch *et al.*, 2005).

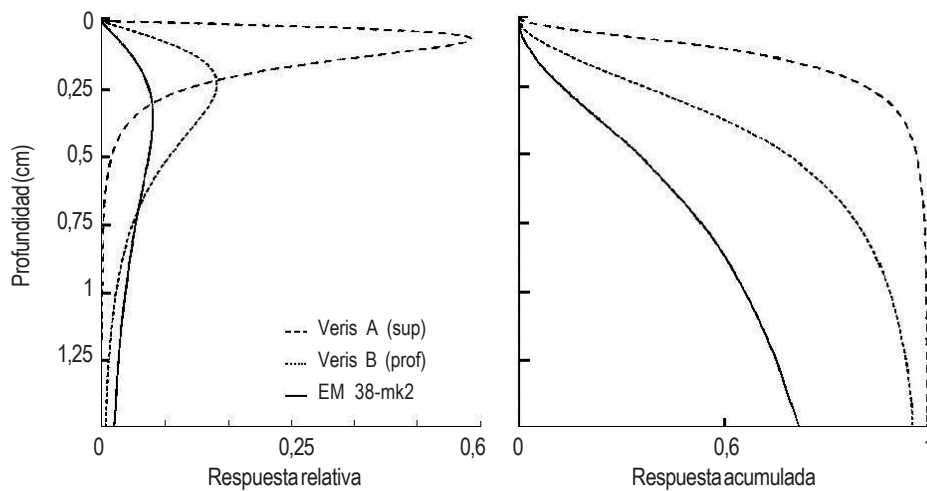


Figura 5. Respuesta relativa y acumulada de los sensores de conductividad eléctrica aparente del suelo como una función de la profundidad. (Adaptado de Sudduth *et al.*, 2001).

Figure 5. Relative and accumulated response of soil apparent electrical conductivity sensor as a function of depth (adapted from Sudduth *et al.*, 2001).

los diferentes volúmenes de suelo examinados por los sensores (Fig. 5). Con las lecturas superficiales del Veris 3100 (CE_{v30}), el 90% de la respuesta se obtiene del suelo por encima de los 30 cm de profundidad. Con las lecturas profundas del Veris 3100 (CE_{v90}), el 90% de la respuesta se obtiene del suelo por encima de los 100 cm de profundidad. Mientras que con el EM38-mk2 (CE_{em}), el 70% de la respuesta se obtiene por encima de 1,5 m y el 90% por encima de los 5 m. Estas curvas teóricas de respuesta se basan en ecuaciones que asumen un volumen de suelo homogéneo (Edwards, 1977; Sudduth *et al.*, 2005).

Variabilidad espacial de la profundidad del suelo y Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em})

P previo al análisis espacial de los datos, se realizó un análisis exploratorio de los datos, calculando estadísticas de resumen univariadas para eliminar la presencia de valores atípicos removiendo aquellos que no están dentro de ± 3 desvío estándar utilizando el procedimiento MEANS (SAS Institute, 2002).

Las variaciones espaciales de la CE_a (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y PS fueron estudiadas a través de técnicas geoestadísticas, que se basan en la teoría de variables regionalizadas (Matheron, 1963).

La estructura de variabilidad y 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 disminución de la autocorrelación espacial entre pares de 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. Se evaluaron funciones de semivarianza esférica y exponencial, reteniéndose aquel modelo con menor Índice de Información de Akaike (AIC). El mejor modelo de semivariograma que se ajustó a la estructura espacial fue el esférico (Peralta *et al.*, 2012a).

Los parámetros de los semivariogramas incluyen: *nugget* (C_0), es la varianza no estructurada; *partial sill* (C_1), es la varianza estructurada; *rango* (a), medida de la continuidad espacial. Para la clasificación de la estructura espacial de la CE_a y PS se utilizó la relación pepita-meseta (nugget:sill), *i.e.* proporción de varianza no explicada respecto a la varianza total ($C_0/(C_0 + C_1)$), adoptando tres clases propuestas en Cambardella *et al.* (1994): débil ($> 0,75$), moderada (0,25-0,75), y fuerte ($< 0,25$). 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 (mediante el uso de semivariogramas) y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Kravchenko & Bullock, 1999).

Correlación espacial entre la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y la profundidad del suelo

Se calcularon correlaciones espaciales para CE_a (CE_{em} , CE_{v30} y CE_{v90}) y profundidad de suelo (PS) utilizando el Índice de Moran Multivariante (IMM) (Moran, 1948), a los fines de comprobar o no la utilidad de CE_a para estimar la PS, y así, diferenciar series de suelo. Este Índice es uno de los más difundidos y empleados para medir la dependencia o correlación espacial entre variables de suelo (Anselin *et al.*, 2004a; Córdoba *et al.*, 2012). Valores positivos (entre 0 y 1) indican autocorrelación directa (similitud entre valores cercanos) y valores negativos (entre -1 y 0) indican autocorrelación inversa (disimilitud entre

las áreas cercanas). Valores del coeficiente cercanos a cero apoyan la hipótesis de aleatoriedad espacial. El análisis de correlación se realizó con los datos de una grilla de 10 x 10 m (Sudduth *et al.*, 2003). EL IMM fue calculado con la herramienta análisis espacial del Software GeoDa 0.9.5 (Anselin *et al.*, 2004b).

La CE_a (CE_{em} , CE_{v30} y CE_{v90}) que presente la mayor correlación espacial con la PS, será seleccionada para estimar la PS, por medio de la utilización de Co-kriging (Cressie, 1993), para incrementar la predicción del análisis. Este método geoestadístico multivariado es muy utilizado en la ciencia del suelo para estimar el comportamiento espacial de las variables de interés (Vaughan *et al.*, 1995; Triantafilis *et al.*, 2001)

Distribución espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y profundidad del suelo

Los datos fueron tomados en un Sistema de Coordenadas Geográficas (World Geodetic System 1984) y transformados en Sistemas de Coordenadas Planas (Gauss Kruger faja 5, Datum Campo Inchauspe).

Para la organización, manipulación, análisis y visualización gráfica de los datos, se utilizaron sistemas de información geográfica (SIG), y se realizaron mapas de contorno de la CE_a medida con ambos instrumentos y de la profundidad del suelo. Los programas utilizados fueron: ArcGIS v9.3.1 (Environmental System Research Institute Inc. (ESRI), Redlands, CA, USA), GeoDa 0.95 (Anselin *et al.*, 2004b) y Google Earth v6.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Delimitación de las series de suelo en base a la profundidad de suelo

En el lote bajo estudio, aparecen en el mapa de suelos a escala 1:50000 las series Sierra de los Padres, La Alianza y Cinco Cerros (suelos con una profundidad menor a 50 cm). Mientras que en el mapa de profundidad del suelo, los suelos con una profundidad menor a los 50 cm prácticamente no están presentes dentro del lote (Fig. 8a y 8e). Además pudo determinarse con el mapa de PS que existen suelos con una profundidad mayor a 80 cm y menor a 150 cm, que corresponden a series no cartografiadas (ausentes en el mapa 1:50000) (Tabla 3). Los mapas de suelo a escala 1:50000 usualmente no logran identificar la variabilidad espacial de los suelos dentro de los lotes, debido a las escalas de los mapas. Esto comprueba la factibilidad del mejoramiento de la cartografía de suelos 1:50000 actualmente utilizada con la profundidad del suelo.

Tabla 3. Comparación cuantitativa de las series cartografiadas y las muestreadas por profundidad de suelo (PS).
Table 3. Quantitative comparison of cartographic series and series sampled by soil depth (PS).

Mapa de Suelos 1:50000		Mapa de Profundidad de suelo	
Serie	Sup. del lote (%)	Rango (cm)	Sup. del lote (%)
Sierra de los Padres			
Cinco Cerros			
La Alianza	12	25 - 50	0,3
Balcarce	23	51 - 80	2,46
(no cartografiada)		81 - 110	28,3
(no cartografiada)		111 - 150	59,7
Mar del Plata	65	+ 150	9,24

Análisis descriptivo

En la Tabla 4 se presentan las estadísticas de resumen de los atributos de suelo estudiados. El análisis exploratorio de los datos, mostró que las mediciones de la CE_a estuvieron distribuidas cerca a la normalidad, ya que los valores promedios y la mediana fueron similares, y el coeficiente de asimetría cercano a cero ($< 0,2$). Los gráficos de probabilidad normal confirman que los datos pueden ser considerados como una distribución normal (Moral *et al.*, 2011) (Fig. 6). Mientras que la PS presentó una ligera asimetría negativa, y por ende, se evaluó la transformación logarítmica de esta variable. Las transformaciones exploradas no permitieron aproximar los valores de esta variable a una distribución normal, y se procedió a utilizar los datos sin transformar. Algunos autores sugieren que los métodos geoestadísticos son sensibles a la condición de normalidad (Hamlet *et al.*, 1986; Cahn *et al.*, 1994). Por otra parte, se señala que esta condición no es restrictiva ya que los métodos geoestadísticos son igualmente aplicables aunque no óptimos (Samper y Carrera, 1990; Wollenhaup *et al.*, 1997) y el efecto de estas consideraciones sobre las estimaciones puede resultar insignificante (Kravchenko y Bullock, 1999; Moral *et al.*, 2011).

Por otro lado, los datos indican que el valor promedio de la CE_{v30} fue bajo (19,3 mS/m) comparado con la CE_{v90} y CE_{em} (26,5 y 27,9 mS/m, respectivamente). Esto puede deberse a la mayor concentración de arcilla como consecuencia de la presencia del horizonte B_r , que se encuentra más allá de los 30 cm de profundidad (Sudduth *et al.*, 2003; Aggelopoulou *et al.*, 2012).

Variabilidad espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em})

La CE_a tuvo diferentes *rangos* de dependencia espacial, mostrando que la CE_{v30} presentó una mayor correlación espacial, comparados con la CE_{v90} y CE_{em} (Fig. 6). 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_{v30} (Fig. 8b).

La autocorrelación espacial fue considerada fuerte para CE_{v30} , ya que $(C_0 / (C_0 + C_1)) < 0,25$, y para la CE_{em} , CE_{v90} y PS fue moderada (Fig. 6). La menor autocorrelación espacial (*rango*) y estructura espacial en la CE_{em} , CE_{v90} , indica que estas variables son menos predecible espa-

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y la profundidad del suelo (PS).

Table 4. Descriptive statistics of soil apparent electrical conductivity (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) and soil depth (PS).

Variables	Prom	Med	Mín	Máx	DE	CV (%)	n	Asim.	Curt.
CE_{v30} (mS/m)	19,3	18,1	11,7	35,2	5,09	26,3	1972	0,14	3,1
CE_{v90} (mS/m)	26,5	26	13	41,8	6,2	23,6	1972	0,13	2,4
CE_{em} (mS/m)	27,9	27,7	12,9	41,9	5,2	18,6	1972	0,16	3,06
PS (cm)	116	120	25	150	32,9	28,4	132	-0,86	3,01

CE_{v30} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 30 cm de profundidad medida por el Veris 3100, CE_{v90} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 90 cm de profundidad medida por el Veris 3100, CE_{em} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 150 cm de profundidad medida por el EM38-mk2.

cialmente que la CE_{v30} , dado al mayor número de factores (espesor del horizonte argílico, contenido de arcilla, entre otros) que pueden estar influenciando el parámetro a ese

nivel del perfil del suelo, que implican que no se establezcan patrones claros de variabilidad espacial como ocurre con CE_{v30} (Sudduth *et al.*, 2003; Sudduth *et al.*, 2005).

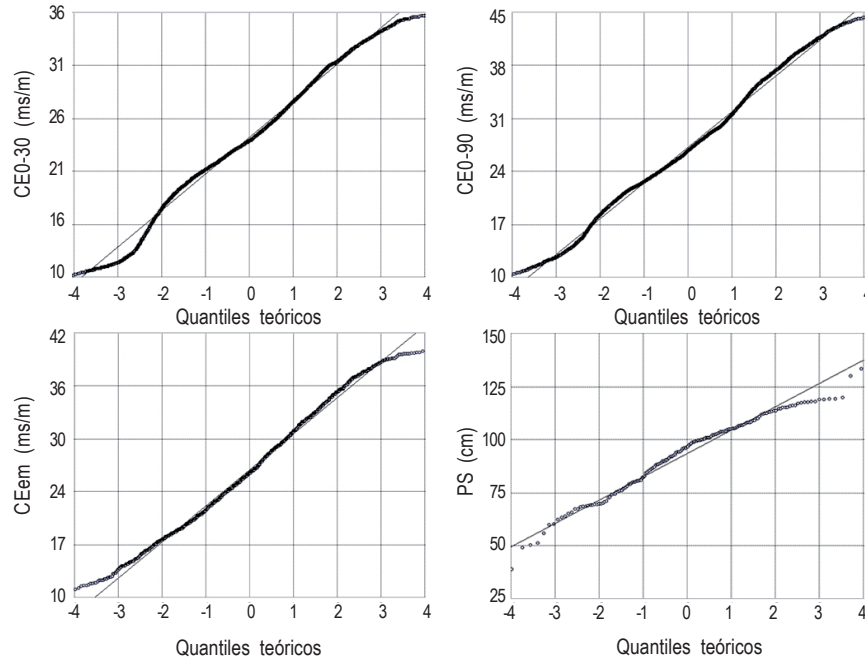


Figura 6. Gráficos de probabilidad normal de la conductividad eléctrica aparente (CE_{v30} , CE_{v90} y CE_{em}) y profundidad de suelo (PS).
 Figure 6. Normal probability plots of soil apparent electrical conductivity (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) and soil depth (PS).

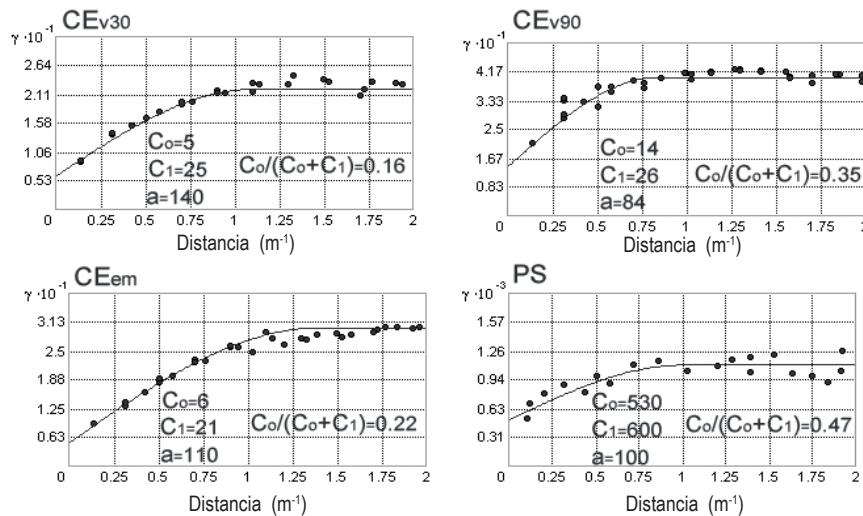


Figura 7. Parámetros de los modelos de semivariogramas esféricos de la conductividad eléctrica aparente (CE_{v30} , CE_{v90} y CE_{em}) y profundidad de suelo (PS). C_0 : varianza no estructurada; C_1 : varianza estructurada; a: medida de la continuidad espacial (rango).
 Figure 7. Parameters of the spherical semivariogram models of soil apparent electrical conductivity (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) and soil depth (PS). C_0 : unstructured variance; C_1 : structured variance; a: measure of spatial continuity (range).

Correlación espacial entre las distintas mediciones de Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y la profundidad del suelo

Las correlaciones espaciales entre todas las mediciones de la CE_a fueron significativas y positivas (Tabla 5). El mayor grado de correlación fue hallado para las mediciones en profundidad (CE_{v90} y CE_{em}) y el menor entre la medición superficial del Veris (CE_{v30}) y del EM38-mk2, lo que se explica con las propias curvas de respuesta de estos instrumentos (Fig. 5). La curva de respuesta de CE_{v90} se encuentra entre las de CE_{v30} y CE_{em} . Si bien las curvas del Veris son similares en forma a la del EM38-mk2, decrecen más rápidamente con la profundidad (Sudduth *et al.*, 2005). Además, se encontró una correlación intermedia entre CE_{v30} y CE_{v90} ($r = 0,46$). Estos resultados son congruentes con los hallados por Sudduth *et al.* (2003).

Las tres mediciones de la CE_a (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) presentaron correlación espacial negativa con la PS (Tabla 5), la CE_{v30} mostró la mayor asociación con la PS. Doménech *et al.*, (2012) informaron que zonas con menores valores de CE_{v30} , se encuentran en zonas con mayores valores de profundidad de suelo. Mientras que las mediciones en profundidad de la CE_a (CE_{v90} y CE_{em}), no tiene un patrón espacial marcado con la PS, posiblemente por el efecto de otras propiedades de suelo (contenido de arcilla, arena, MO y CIC). Otros autores (Boettinger *et al.*, 1997) encontraron mayores correlaciones debido a que trabajaron con promedios de las diferentes clases (rangos) de CE_a ($n = 10$). La correlación entre CE_{em} y la profundidad del suelo fue intermedia. A través de los mapas, se logra identificar una zona de baja CE_{em} y otra de alta CE_{em} que corresponden a valores similares de

PS (someros) (Fig. 8), atribuible a la diferencia en el tipo de mineralogía de la limitante en la profundidad del suelo (Boettinger *et al.*, 1997). Debido a que el EM38-mk2 mide un promedio de CE_a en una gran profundidad, los valores medidos en zonas con roca fueron más bajos que los medidos en zonas con horizontes petrocálcicos (tosca). La *cuarcitas* una roca metamórfica dura, compacta, extremadamente firme, lo cual produce una reducción del espacio poroso y por ende, la capacidad para albergar agua. El contenido de agua es el principal factor que influye en los valores de CE_a (Rhoades *et al.*, 1989). En contraste, las zonas con horizontes petrocálcicos (tosca) presentaron los mayores valores de CE_a , atribuible a que los carbonatos de calcio y el Ca^{++} intercambiable en la solución del suelo tienen influencia positiva en la CE_a (Kühn *et al.*, 2009; Heiniger *et al.*, 2003). Además pudo corroborarse con una calicata que en la zona con valores bajos de CE_{em} (Fig. 8), la limitante es de origen lítico (cuarcita) cuyas propiedades físico-químicas le confieren baja conductividad eléctrica.

La CE_{v30} presentó amplio rango (a), escaso efecto pepita en su estructura espacial y estuvo fuertemente asociada espacialmente a la PS, por ende la CE_{v30} fue seleccionada como co-variable para estimar la PS.

La utilización de la CE_{v30} como variable auxiliar permitió disminuir el efecto pepita (varianza no estructural). Isaaks & Srivastava (1989), mencionaron que, en los casos donde hay suficiente información muestral de variables auxiliares (CE_{v30} , $n = 1972$), los costos y tiempo de muestreo de la variable de interés son una limitante para su realización (PS, $n = 132$), se recomienda la aplicación del método *co-kriging*.

Tabla 5. Correlación espacial (índice de Moran multivariado, IMM) entre la Conductividad Eléctrica Aparente (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) y la profundidad del suelo (PS).

Table 5. Correlación espacial (Moran multivariate index, IMM) between soil apparent electrical conductivity (CE_{v30} , CE_{v90} , CE_{em}) and soil depth (PS)

CE_a (mS/m)	IMM		
	CE_{v30}	CE_{v90}	CE_{em}
CE_{v30}	1		
CE_{v90}	0,46 *	1	
CE_{em}	0,32 *	0,77 **	1
PS	-0,58 **	-0,28 *	-0,37 *

Nivel de significancia: *, $p < 0.01$; Nivel de significancia: ** $p < 0.001$.

CE_{v30} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 30 cm de profundidad medida por el Veris 3100.

CE_{v90} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 90 cm de profundidad medida por el Veris 3100.

CE_{em} : Conductividad Eléctrica Aparente hasta 150 cm de profundidad medida por el EM38-mk2.

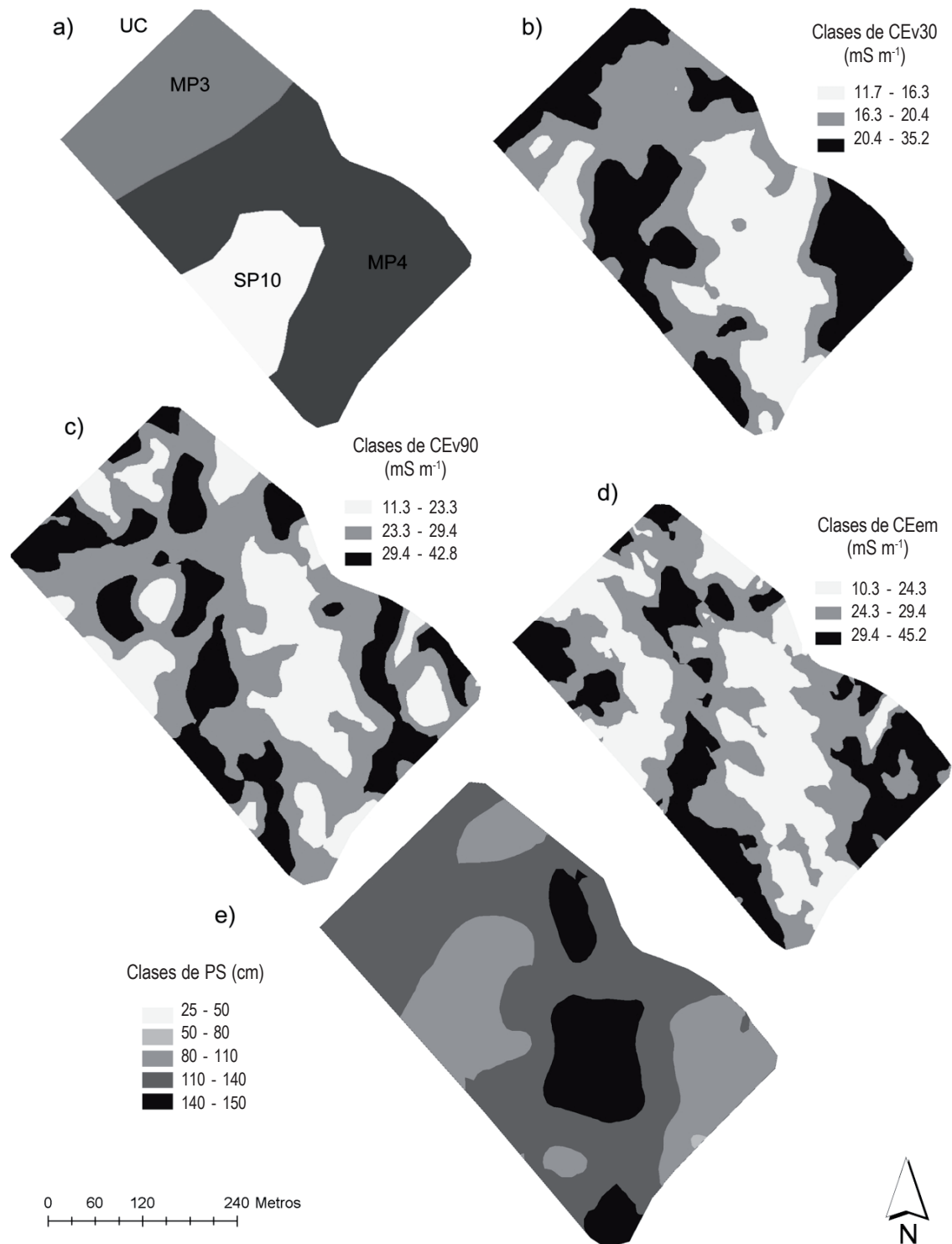


Figura 8. a) Unidades Cartográficas. b) Mapa de contorno de la profundidad del suelo (PS). c) Mapa de contorno de la CE_{v30}. d) Mapa de contorno de la CE_{v90}. e) Mapa de contorno de la CE_{em}.

Figure 8. a) Mapping units. b) Outline map of soil depth (PS). c) outline map of CE_{v30}. d) Outline map of CE_{v90}. e) Outline map of CE_{em}.

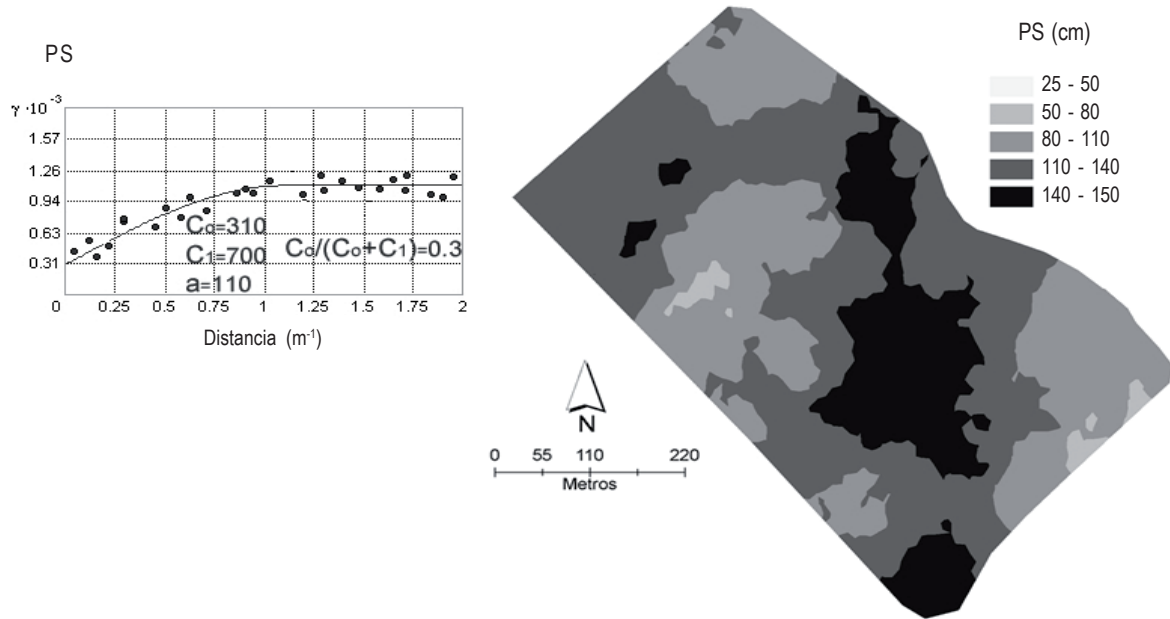


Figura 9. Parámetros de los modelos de semivariogramas esféricos de la profundidad de suelo (PS). C_0 : varianza no estructurada; C_1 : varianza estructurada; a : medida de la continuidad espacial (rango); y mapa de la profundidad de suelo por el método Co-kriging.

Figure 9. Parameters of the spherical semivariogram models of soil depth (PS). C_0 : unstructured variance; C_1 : structured variance; a : measure of spatial continuity (range); and depth soil map by co-kriging method.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha podido comprobar la factibilidad de optimizar los mapas de suelo a escala 1:50000 actuales muestreando la profundidad efectiva del suelo para identificar series de suelo. La fuerte estructura espacial y amplios rangos (m) permitieron modelar la distribución espacial de la CE_a a escala de lote, sugiriendo que la CE_a está asociada a la variabilidad espacial del suelo, y no a errores de muestreo ó variación a distancias menores a la escala de observación empleada. Además, la medición de la CE_a medida por el sensor de contacto (Veris 3100) y no-contacto (EM38-mk2) estuvo asociada espacialmente y presentó asociación espacial con la profundidad del suelo. Por ende, la CE_a (CE_{v30}) puede usarse como indicador de las series de suelo en lotes con presencia de tosca y roca del Sudeste Bonaerense.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos la colaboración de H. Angelini en la toma de datos y calibración de los equipos. También queremos agradecer al Ing. Agr. (MSc) Germán Domínguez por sus comentarios para mejorar el manuscrito. Además, queremos agradecerle al programa de becas de posgrado del

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Este trabajo fue financiado por el Proyecto de INTA, Desarrollo y Aplicación de la Tecnología de Agricultura de Precisión para el Manejo de Cultivos (AEA13722).

BIBLIOGRAFÍA

- Aggelopoulou, K; A Castrignanò; T Gemtos & D De Benedetto. 2012. Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. *Computers and Electronics in Agriculture*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.009>
- Amin, MS; W Aimrun; SM Eltaib & CS Chan. 2004. Spatial soil variability mapping using electrical conductivity sensor for precision farming of rice. *International Journal of Engineering & Technology* 1(1): 47-57.
- Anselin, L; I Syabri & Y Kho. 2004b. GeoDa: An introduction to spatial data analysis. Available at: geoda.uiuc.edu/pdf/geodaGA.pdf. Acceso 10 marzo 2013.
- Anselin, L; R Bongiovanni & J Lowenberg DeBoer. 2004a. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *American Journal of Agricultural Economics* 86(3): 675:687.
- Bang, J. 2005. Characterization of soil spatial variability for sitespecific management using soil electrical conductivity and other remotely sensed data. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Raleigh, NC, USA. 274 p.

- Boettinger, JL; JA Doolittle; NE West; EW Bork & EW Schupp. 1997. Nondestructive assessment of rangeland soil depth to petrocalcic horizon using electromagnetic induction. *Arid Soil Research Rehabilitation* 11: 375-390.
- Buschiazzo, D. 1986. Estudio sobre la tosca. Parte I: Evidencias de un movimiento descendente del carbonato de base a la interpretación de características macro y geomorfológicas. *Ciencia del Suelo* 4: 55-65.
- Cahn, MD; JW Hummel & BH Brouer. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society American Journal* 58: 1240-1248.
- Cambardella, CA; TB Moorman; JM Novak, TB Parkin; RF Karlen & AE Konopka. 1994. Field scale variability in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal* 58: 1501-1511.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 103-133.
- 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.
- Cressie, N. 1993. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.
- Domenech, M.; JL Costa; M Castro Franco. 2012. Uso de la conductividad eléctrica aparente del suelo para diferenciar series de suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. En CD.
- Dent, D & A Young. 1981. *Soil Survey and Land Evaluation*. George Allen & Unwin Ltd, London, UK. 130 p.
- Doerge, TA. 1999. Site-Specific Management Guidelines: Management zone concepts. SSMG-2, Potash & Phosphate Institute. Norcross, GA. 4 p.
- Edwards, LS. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* 42: 1020-1036.
- ESRI. 2009. Using ArcGIS 9.3.1. Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, CA.
- Farahani, HJ & RL Flynn. 2007. Map quality & zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. *Precision Agriculture* 96(2): 151-159.
- Fenton, TE & MA Lauterbach. 1999. Soil map unit composition and scale of mapping related to interpretations for precision soil and crop management in Iowa. In: Robert, PC; RH Rust; WE Larson (ed.). *Precision agriculture*. Proc. Int. Conf., 4th, St. Paul, MN. 19-22 July 1998. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp. 239-251.
- Google Earth v6.0. 2012. Disponible en: <http://www.google.com/intl/es/earth/index.html>
- Hamlett, JM; R Horton & C Cressie. 1986. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis. *Soil Science Society American Journal* 50: 868-875.
- Heiniger, RW; RG McBride & DE Clay. 2003. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. *Agronomy Journal* 95: 508-519.
- Hendrickx, JMH & RG Kachanoski. 2002. Indirect measurement of solute concentration: Nonintrusive electromagnetic induction. In: Dane, JH & GC Topp (ed.). *Methods of soil Analysis*. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 1297-1306.
- Heuvelink, GBM & R Webster. 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* 100: 269-301.
- INTA. 2011. Cartas de suelo de la República Argentina, Provincia de Buenos Aires. [en línea] <<http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/finalidad.htm>> [Consulta 10 de marzo 2011].
- INTA. CIRN. Instituto de Suelos. Hoja - "3760-35 "Claraz", PBA, Castelar: Instituto de Suelos AICET, 1970. 72 p, 4 fotocartas, 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 Science Society American Journal* 65: 1829-1837.
- Kravchenko, A & D Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91: 393-400.
- Kühn, J; A Brenning; M Wehrhan & S Koszinski. 2009. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture* 10: 490-507.
- Lesch, SM; DL Corwin & DA Robinson. 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 351-378.
- Matheron, G. 1963. Principles of geoestatistic. *Econ. Geol.* 58: 1246-1266.
- McNeill, JD. 1980. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Technical Note TN-5, Geonics, Ontario, Canada. 21 p.
- Moral, FJ; JM Terrón & FJ Rebollo. 2011. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. *Computers and Electronics in Agriculture* 75, 223-230.
- Moran, PA. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 10, 243-251.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini & H Angelini. 2012a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the Southeastern Pampas. *Canadian Journal of Soil Science* doi:10.4141/CJSS2012-022.
- Peralta, NR; M Castro Franco; L Herber & JL Costa. 2012b. 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.
- Rhoades, JD; NA Manteghi; PJ Shouse & WJ Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society American Journal* 53: 433-439.
- Sadras, VO & PA Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agronomy Journal* 93: 577-583.
- Samper, FJ & J Carrera. 1990. *Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 484 p.
- SAS Institute. *SAS User's Guide*. 2002. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary. NC.
- Shaner, DL; MK Brodahl & GW Buchleiter. 2008. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? *Agronomy Journal* 100: 1472-1480.

- Sudduth, KA; NR Kitchen; GA Bollero; DG Bullock & WJ Wiebold. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal* 95: 472-482.
- Sudduth, KA; NR Kitchen; WJ Wiebold; WD Batchelor; GA Bollero; DG Bullock; DE Clay; HL Palm; FJ Pierce & KD Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 263-283.
- Sudduth, KA; ST Drummond & NR Kitchen. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 239-264.
- Terrón, JM; JR Marques da Silva; FJ Moral & A García-Ferrer. 2011. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agriculture* 12: 750-761.
- Triantafyllis, J; IOA Odeh & AB McBratney. 2001. Five Geostatistical Models to Predict Soil Salinity from Electromagnetic Induction Data Across Irrigated Cotton. *Soil Science Society of America Journal* 65: 869-878.
- Veris Technologies. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. Veris Technologies, Salina. KS. [En línea] <<http://www.veristech.com>>. [Consulta 10 de octubre 2011].
- Vaughan, PJ; SM Lesch; DL Corwin & DG Cone. 1995. Water content effect on soil salinity prediction: A geostatistical study using cokriging. *Soil Science Society of America Journal* 59: 1146-1156.
- Vitharana, UWA; T Saey; L Cockx ; D Simpson; H Vermeersch & M Van Meirvenne. 2008. Upgrading a 1/20,000 soil map with an apparent electrical conductivity survey. *Geoderma* 148: 107-112.
- Wollenhaupt, NC; RP Wolkowsky & MK Clayton. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *Journal of Production Agriculture* 7: 441-448.