

## DELIMITACIÓN DE AMBIENTES EDÁFICOS EN SUELOS DE LA PAMPA DEPRIMIDA MEDIANTE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE Y LA ELEVACIÓN

PABLO LEANDRO CICORE<sup>1\*</sup>; HERNÁN RAÚL SÁNCHEZ<sup>2</sup>; NAHUEL RAÚL PERALTA<sup>2-3</sup>; MAURICIO CASTRO FRANCO<sup>3</sup>; VIRGINIA CAROLINA APARICIO<sup>1</sup> & JOSÉ LUIS COSTA<sup>1-2</sup>

Recibido: 02-06-14

Recibido con revisiones: 29-07-15

Aceptado: 30-07-15

### RESUMEN

Los suelos de la Pampa Deprimida presentan una elevada heterogeneidad espacial. Por ende, una alternativa para el manejo de los mismos podría ser la incorporación de las técnicas de manejo por ambientes (MA). Por ello, nuestro objetivo fue medir la conductividad eléctrica aparente (CEa) y la elevación, relacionarlas con diferentes parámetros edáficos y evaluar si permiten delimitar áreas edáficas homogéneas. En dos lotes localizados en General Madariaga, se midieron y georreferenciaron la CEa y la elevación con un sensor de medición directa (Geonics EM38) y un DGPS respectivamente. Con los datos obtenidos se confeccionaron mapas de estas variables utilizando técnicas de interpolación espacial. Se tomaron muestras de suelo georreferenciadas en las que se midió materia orgánica (MO), humedad gravimétrica, conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe), pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Las propiedades de suelo y la CEa fueron medidas hasta los 50 cm de profundidad del suelo. La CEe, el pH y la humedad gravimétrica presentaron una relación estrecha con la CEa ( $r^2=0,77$ ; 0,55 y 0,52, respectivamente). En cambio, la MO y la CIC mostraron un grado de ajuste inferior ( $r^2=0,27$  y 0,33, respectivamente). Se realizaron mapas de los lotes dividiéndolos en la cantidad de zonas edáficas determinadas mediante un análisis de clúster multivariado y se realizó un ANOVA a las variables de suelo analizadas en función de cada una de estas zonas. Esto permitió determinar que la CEa y la elevación serían herramientas útiles para delimitar ambientes edáficos en suelos de aptitud ganadera de la Pampa Deprimida. Se sugiere continuar con futuras investigaciones para corroborar estos resultados preliminares.

**Palabras clave.** Análisis multivariado, Propiedades de suelo, Suelos bajos, Variabilidad espacial.

### FLOODING PAMPAS ZONE DELIMITATION USING APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND ELEVATION

#### ABSTRACT

In the Flooding Pampas, spatial variability of soil types at farm and field scale is usually very high. We evaluated whether apparent electrical conductivity (ECa) and elevation are a potential estimator of soil properties and their possible use as tools for the delimitation of homogeneous edaphic zones. In two sites located in General Madariaga, ECa data was collected with a non-contact, electromagnetic induction-based ECa sensor (Geonics EM38) and elevation data was collected using a DGPS. This data was used to create ECa maps in both fields using spatial interpolation methods. Soil samples were georeferenced and were analyzed for soil organic matter (SOM), electrical conductivity of the saturation extract (ECe), moisture content, pH and cation exchange capacity (CEC). Soil properties and ECa were measured at the 0-50 cm soil depth. ECe, pH and moisture content exhibited a higher correlation with ECa ( $r^2=0,77$ ; 0,55 and 0,52 respectively), than SOM and CEC ( $r^2=0,27$  and 0,33 respectively). ECa and elevation data were jointly analyzed for edaphic zones delineation using MZA software. The ANOVA showed that ECa and elevation successfully delimited edaphic zones associated with spatial distribution of soil properties in soils of the Flooding Pampas. However, further experimentation is necessary to confirm these findings.

**Key words.** Multivariate techniques, Soil properties, Low land soils, Spatial variability.

1 INTA Balcarce - Balcarce - Argentina;

2 Facultad Ciencias Agrarias - UNMdP;

3 CONICET

\* Autor de contacto: cicore.pabloleandro@inta.gob.ar

## INTRODUCCIÓN

La región pampeana reúne características edafoclimáticas que la convierten en una de las áreas de mayor productividad agrícola del mundo. Por ello, casi toda la superficie está sembrada con cereales y oleaginosas. Sin embargo, en el centro-este de esta región, en la provincia de Buenos Aires, se extiende una subregión poco apta para la agricultura denominada Pampa Deprimida (Rodríguez & Jacobo, 2012). En esta área predominan suelos que se caracterizan por una serie de restricciones que afectan el crecimiento de los cultivos (mal drenaje, anegamientos, alcalinidad, salinidad, etc.) (Taboada *et al.*, 1999). Por ende, suelen destinarse a la producción pecuaria en base a pastizales naturales o pasturas implantadas.

El incremento de la productividad en los suelos de la Pampa Deprimida puede lograrse mediante algunas prácticas de manejo como la aplicación de correctivos químicos (Costa & Godz, 1999), la adecuada fertilización (Agnusdei *et al.*, 2010) o la implantación de la especie mejor adaptada a cada condición edáfica. Para ello, es necesario conocer las potencialidades y limitaciones de los mismos. Sin embargo, estos suelos presentan una elevada heterogeneidad espacial en sus propiedades edáficas (Taboada *et al.*, 1998). En este contexto, una alternativa podría ser la incorporación de las técnicas de manejo por ambientes (MA). En agricultura para determinar la variabilidad de los factores de suelo que afectan el rendimiento se han descrito varios métodos. La medición geoespacial de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa), ha sido una de las herramientas más utilizadas (Moral *et al.*, 2010; Peralta & Costa, 2013). Este parámetro es influenciado por propiedades de suelo como la disponibilidad de agua (Hossain *et al.*, 2010), la salinidad (Rhoades *et al.*, 1976), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Kitchen *et al.*, 2005), el pH (Serrano *et al.*, 2010) y la materia orgánica (MO) (Corwin & Lesch, 2005).

La información disponible sobre la relación de la CEa con características edáficas es muy abundante para suelos de aptitud agrícola donde se establecen cultivos con destino a cosecha (Kitchen *et al.*, 2005; Corwin & Lesch, 2005; Moral *et al.*, 2010). Sin embargo, el uso de este parámetro en suelos de aptitud ganadera es escaso, Serrano *et al.* (2010) y (2013) hallaron correlaciones positivas y significativas entre pH y CEa y entre producción de biomasa de una pastura consociada y CEa, respectivamente. Hossain *et al.* (2010) demostraron la relación entre este parámetro y el contenido de humedad en un suelo que tenía implan-

tada una pastura naturalizada y Guretzky *et al.* (2008) utilizaron la CEa para determinar el patrón espacial de distribución de leguminosas dentro de una pastura mixta debido a que, esta especie, se ubica en las áreas de mayor disponibilidad hídrica y menor pH.

En concordancia con la literatura internacional, para la región pampeana, la mayoría de los trabajos donde se utilizó la CEa para predecir características edáficas han sido realizados en lotes de aptitud agrícola, Peralta *et al.* (2011) y (2013a) observaron, en el sudeste Bonaerense, que la CEa tiene una elevada correlación con la conductividad eléctrica del extracto (CEe) y la humedad del suelo respectivamente. En el mismo sentido, Paggi *et al.* (2013) y Bosch Mayol *et al.* (2012) determinaron una estrecha asociación entre la CEa y la profundidad del suelo y el sodio soluble, respectivamente.

La relación existente entre las propiedades de suelo y la CEa permitiría delimitar ambientes edáficos en función de esta última variable. Existen diferentes técnicas para cumplir este objetivo. Una de las más utilizadas es el análisis cluster mediante el cual cada sitio del lote es asignado a un conglomerado y estos pueden ser usados como zonas de manejo (Fridgen *et al.*, 2004). Este tipo de análisis puede ser realizado a partir de una sola variable (univariado) o de varias (multivariado). Fraisse *et al.* (2001) indicaron que, la delimitación de áreas de manejo homogéneo, puede realizarse en función de la topografía y la CEa. En la Pampa Deprimida si bien el paisaje se caracteriza por el relieve plano se pueden distinguir diversos ambientes edáficos determinados por la posición topográfica (Batista *et al.*, 2005). Además, la topografía determina el flujo y acumulación del agua (Pachepsky *et al.*, 2001). Por esto, la elevación del terreno podría ser un importante factor para la caracterización de ambientes en esta región.

Si bien en suelos de aptitud ganadera de la región pampeana existen algunos trabajos que relacionan la CEa con parámetros edáficos para caracterizar ambientes con el objetivo de aplicar dosis variables de enmiendas calcáreas (Gambaudo *et al.*, 2010), la información existente en suelos ganaderos de la Pampa Deprimida, es nula. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo fueron: (I) relacionar propiedades de suelo con la CEa, (II) evaluar la posibilidad de utilizar este parámetro para determinar ambientes edáficos y (III) determinar si la inclusión de la elevación del terreno mejora la delimitación de ambientes realizada a partir de la CEa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitios experimentales

La experiencia se realizó en dos lotes de aptitud ganadera ubicados en el partido de General Madariaga denominados: Del Maestro (37°17'24,23 S; 57°19'25,63 O) y Haudini (37°18'25,53 S; 57°21'24,73 O). En la Tabla 1 se describen la superficie, las series de suelo y la clasificación de los suelos de los lotes bajo estudio (INTA, 2014).

### Medición de la Conductividad Eléctrica Aparente y elevación del terreno

La CEa se midió utilizando el EM38 (Geonics Limited, 2003) y la elevación del terreno mediante un DGPS (Trimble Navigation Limited, 2008). La medición de la CEa se realizó hasta los 50 cm de profundidad. Para ello, el EM38 fue calibrado según las instrucciones del manual y transportado por el lote en transectas paralelas distanciadas 20 m aproximadamente (Paggi *et al.*, 2013).

### Variabilidad espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente (CEa)

Para interpolar la variabilidad espacial de la CEa y la elevación se utilizó la geoestadística (Isaack & Srivastava, 1989). El primer paso en la realización de los mapas de CEa fue confeccionar un semivariograma experimental. Luego, se proce-

dió al ajuste de un modelo teórico para describir dicha variabilidad. Por último se realizó la predicción en puntos, dentro de los lotes, donde no se midieron estas variables mediante el método de interpolación Kriging ordinario. Para la realización de cada uno de los pasos anteriormente mencionados se utilizó el software ArcGIS 9.3.1 (Environmental Systems Research Institute, 2008). Los mapas de elevación se confeccionaron mediante la herramienta TIN del software ArcGIS 9.3.1 (Environmental Systems Research Institute, 2008).

### Determinación de ambientes dentro de los lotes

En cada mapa de CEa y elevación se generó una grilla de 30x30 m, lo cual permitió trabajar a la misma escala para realizar la determinación de ambientes mediante el software Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000). Este programa realiza la división de ambientes mediante un análisis cluster (Fridgen *et al.*, 2004). Para ello el MZA estimó dos parámetros: el Índice de rendimiento difuso (FPI) y la clasificación entrópica normalizada (NCE) (Fridgen *et al.*, 2004). El número óptimo de ambientes se determinó cuando, ambos parámetros fueron mínimos, lo que representa menor grado de solapamiento y mayor cantidad de organización (Fridgen *et al.*, 2004). El análisis de cluster se realizó utilizando solamente la CEa y la combinación de CEa y elevación. La configuración del MZA, en ambos casos, fue la siguiente: el exponente difuso se fijó en el valor convencional de 1,30, el número máximo de

Tabla 1. Lotes, superficie y clasificación de suelos.  
Table 1. Experimental sites, surface, and soil classifications.

Lote	Superficie (ha)	Símbolo cartográfico	Serie de suelo	Clasificación de suelo
Del Maestro	45	GP1	General Piran (40%)	Natracualf Molico
			Coronel Vidal (25%)	Natracuol Típico
			Las Armas (25%)	Natracuol Típico
Suelos indiferenciados (10%)				
Del Maestro	45	CHj	El Chajá (40%)	Natracuol Típico
			General Piran (30%)	Natracualf Molico
			Estación Invernadas (20%)	Argiaucuel Abruptico
Santo Domingo (10%)				
Del Maestro	45	LRs3	Las Armas (40%)	Natracuol Típico
			Monsalvo (25%)	Argiudol Acuico
			Coronel Vidal (25%)	Natracuol Típico
Suelos indiferenciados (10%)				
Haudini	22	LRs3	Las Armas (40%)	Natracuol Típico
			Monsalvo (25%)	Argiudol Acuico
			Coronel Vidal (25%)	Natracuol Típico
Suelos indiferenciados (10%)				

Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires (1:50000) (INTA, 2014).

iteraciones fue 300, el criterio de convergencia fue 0,0001 y el número mínimo y máximo de zonas a dividir los lotes fue 2 y 5, respectivamente (Córdoba *et al.*, 2013). Para el análisis univariado (CEa) se utilizó como medida de similitud la distancia de Euclidean y para el cluster multivariado (CEa y elevación) se usó la distancia de Mahalanobis. Mediante el software ArcGIS 9.3.1 (Environmental Systems Research Institute, 2008) se realizaron mapas dividiéndolos en la cantidad de zonas determinadas mediante el análisis de clúster multivariado. Los valores y amplitud de las zonas fueron obtenidos mediante la clasificación de los datos en cuantiles (Peralta *et al.*, 2013a).

### Muestreo y análisis de suelo

En función de las zonas determinadas mediante el análisis multivariado, en cada lote, nueve puntos fueron georreferenciados. En estos puntos se realizó un muestreo de suelo hasta los 50 cm de profundidad tomando tres sub-muestras. Las muestras de suelo fueron separadas en dos estratos (0-30 y 30-50 cm). Una alícuota de las muestras se secó a 105 °C durante 24 horas para la determinación de humedad por el método gravimétrico. El resto de las muestras fueron secadas a una temperatura de 30 °C, molidas y tamizadas hasta pasar por una malla 2 mm para las determinaciones de pH (relación suelo: agua 1:2,5), CIC (Chapman, 1965) y la CEe. Para esta última variable se elaboró pasta saturada de suelo para su posterior filtración. En el extracto se midió la CEe en un equipo Thermo Orion modelo 150 Aplus. Posteriormente, las muestras hasta los 30 cm de profundidad, fueron tamizadas hasta pasar por una malla de 0,5 mm para la determinación de MO (Walkley & Black, 1934).

### Análisis estadístico

Se ajustaron regresiones simples entre las propiedades del suelo y la CEa con el procedimiento PROC REC (SAS Institute, 2007). Para calcular el valor de CEa a utilizar en las regresiones se utilizó la herramienta Buffer Tools de ArcGIS 9.3.1 (Environmental Systems Research Institute, 2008). Con el objetivo de evaluar cada una de las zonas edáficas potenciales delimitadas mediante el software MZA se realizó el ANVA correspondiente a las propiedades de suelo y un análisis discriminante, con el software Infostat (Infostat, 2008). Para la realización de los ANVA se utilizó un diseño completamente aleatorizado con las zonas edáficas como tratamientos y los puntos de muestreo como repeticiones. Los ANVA se realizaron con el procedimiento PROC GLM (SAS Institute, 2007) y cuando alguno de los mismos indicó diferencias significativas, la comparación de medias se realizó mediante el test de la diferencia mínima significativa (LSD).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1a y 1b se presentan los mapas de distribución espacial de CEa obtenidos por kriging ordinario con

sus respectivos rangos para los lotes Haudini y Del Maestro. En los mapas obtenidos se puede observar que existe variabilidad espacial y que a su vez ésta tiene una distribución heterogénea. Esto sugiere la posibilidad, como se ha analizado en diferentes trabajos en suelos de aptitud agrícola del sudeste bonaerense (Peralta *et al.*, 2011; Peralta *et al.*, 2013b), de utilizar la CEa para detectar ambientes edáficos en suelos de aptitud ganadera de la Pampa Deprimida.

La CEe se relacionó directa, lineal y significativamente con la CEa (Tabla 2). Este comportamiento se debe a que la CEe es un estimador de la concentración de sales de un suelo (Rysan & Sarec, 2008) y estas afectan considerablemente la medición de la CEa, debido a que la capacidad de conducir la corriente eléctrica depende de la cantidad de iones que se encuentran en la solución del suelo (Rhoades *et al.*, 1989; Peralta & Costa, 2013). Coincidiendo con nuestros resultados Gambuado *et al.* (2010) encontraron, en suelos salinos de aptitud ganadera de la provincia de Santa Fe, diferencias significativas en la CEe entre ambientes delimitados mediante la CEa.

Como en el caso de la CEe, el pH, presentó una relación estrecha con la CEa en los lotes analizados (Tabla 2). La relación entre estas variables fue lineal y significativa (Tabla 2). En lotes de aptitud agrícola la relación entre estas variables es inconsistente (Peralta *et al.*, 2013a) debido presumiblemente a la escasa variabilidad del pH en este tipo de suelos. Sin embargo, resultados obtenidos por Serrano *et al.* (2010), en suelos de aptitud ganadera, indican asociación entre pH y CEa, lo que coincide con lo determinado en esta experiencia. La relación lineal entre estas variables es consecuencia de la elevada asociación entre pH y sodio intercambiable (Corwin *et al.*, 2003).

La relación entre humedad gravimétrica y la CEa fue lineal y significativa (Tabla 2). El contenido de humedad del suelo es uno de los principales factores que influyen la CEa, ya que en el suelo, lo que conduce la electricidad es la fase líquida, la cual depende del contenido de agua del suelo (Friedman, 2005). En este sentido, Hossain *et al.* (2010) reportaron resultados similares en un suelo que tenía implantada una pastura naturalizada.

En los primeros 50 cm de profundidad la CIC varía en función del contenido de MO y, principalmente de arcilla. La cantidad de partículas finas afecta la medición de la CEa debido a que la conducción de la electricidad se realiza, principalmente, a través de macro y microporos continuos llenos de agua (Rhoades *et al.*, 1989). Los suelos con ele-

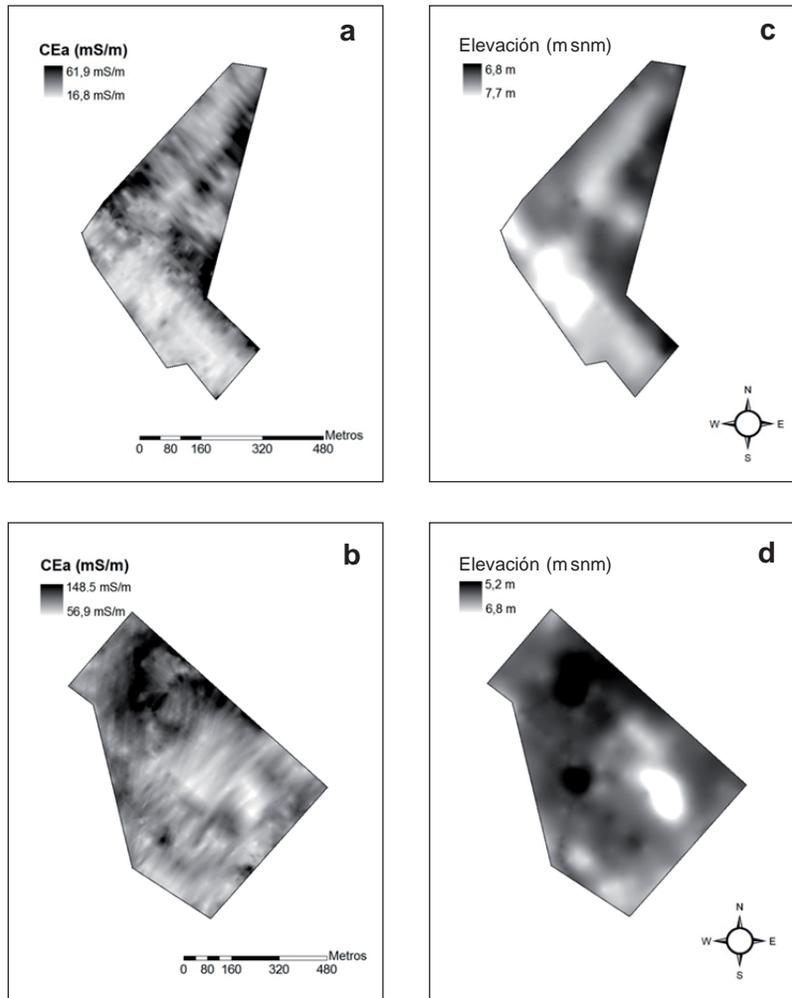


Figura 1. Mapas de conductividad eléctrica aparente (CEa) (a y b) y de elevación del terreno (c y d) en los lotes Haudini y Del Maestro, respectivamente.  
 Figure 1. Maps of apparent soil electrical conductivity (ECa) (a and b) and altitude (c and d) at Haudini and Del Maestro fields, respectively.

Tabla 2. Parámetros y coeficientes de determinación de las funciones ajustadas entre la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) y las variables edáficas materia orgánica (MO), conductividad del extracto de saturación (CEe), Humedad gravimétrica, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Table 2. Coefficients for models describing relationships between apparent electrical conductivity (ECa) and soil organic matter (SOM); electrical conductivity of the saturation extract (CEe), moisture content, pH and cation exchange capacity (CEC).

Variable edáfica	A	$\beta$	$r^2$	$r^2$ Aj	p-valor
MO	0,0015	5,11	0,27	0,22	0,05
CEe	0,0356	0,57	0,77	0,75	0,0001
Humedad	0,0606	15,08	0,52	0,48	0,003
pH	0,0154	5,93	0,55	0,47	0,003
CIC	0,0526	23,57	0,31	0,26	0,03

vado porcentaje de arcilla tienen mayor contacto partícula-partícula y por ende, mayor número de poros pequeños que retienen agua con mayor fuerza por lo que permiten conducir mejor la electricidad (Rhoades *et al.*, 1989). Por esto, se estableció una relación lineal entre CIC y la CEa aunque la misma mostró un grado de ajuste inferior ( $r^2=0,31$ ) (Tabla 2) a las observadas con pH, CEe y humedad gravimétrica (Tabla 2).

Se determinó una relación lineal y no significativa ( $p=0,05$ ) entre CEa y MO explicando la CEa solo el 27% de la variación en el contenido de MO (Tabla 2). Este comportamiento no coincide con lo reportado por otros investigadores (Peralta *et al.*, 2013a). Esto podría deberse a que, en nuestro estudio, la profundidad de muestreo de la CEa y la MO no fueron coincidentes (50 y 30 cm, respectivamente).

El análisis de clúster univariado (CEa) determinó que el número de ambientes óptimo para los lotes Del Maestro y Haudini es cinco (datos no mostrados). La literatura recomienda no utilizar más de tres o cuatro ambientes debido a que delimitar más de cuatro ambientes tiene pocas ventajas adicionales (Fraisse *et al.*, 2001). Diversos autores indicaron que la delimitación de áreas de manejo homogéneo en función de la topografía y la CEa permite determinar la variabilidad de rendimiento de cultivos agrícolas (Fraisse *et al.*, 2001; Kitchen *et al.*, 2005; Córdoba *et al.*, 2013; Peralta *et al.*, 2013b) y la distribución de leguminosas dentro de una pastura (Guretzky *et al.*, 2008) porque ambas variables afectan características edáficas. En

los lotes evaluados, la elevación del mismo modo que la CEa, muestra variabilidad espacial y distribución heterogénea (Fig. 1 c y d). Por ello, se procedió a incluir esta variable topográfica en el análisis cluster para la determinación de ambientes edáficos.

En la Figura 2 se representaron gráficamente los valores de FPI y NCE y el número de conglomerados (zonas edáficas) para los lotes Haudini y Del Maestro del análisis cluster multivariado. El número óptimo de zonas se determina cuando FPI y NCE alcanzan el valor mínimo (Córdoba *et al.*, 2013). En el caso del lote Del Maestro el número óptimo de ambientes o zonas edáficas potenciales fue tres (Fig. 2). La coincidencia en el número de ambientes entre los índices determina que no es preciso agregar nuevas variables al análisis (Fridgen *et al.*, 2004). En cambio, en el lote Haudini no hubo coincidencia entre índices (Fig. 2). Por lo tanto, se procedió a seleccionar la menor cantidad de ambientes introducidos en el análisis multivariado (Córdoba *et al.*, 2013). En la Figura 3 se muestran los mapas de los lotes evaluados con las zonas edáficas definidas a partir del análisis cluster multivariado (CEa y elevación).

Con el objetivo de determinar diferencias entre las zonas edáficas se realizó un ANVA a las variables de suelo analizadas en función de cada una de estas zonas. En el análisis estadístico de la CEe se detectaron diferencias significativas entre zonas en ambos lotes (Tabla 3). Sin embargo, en el lote Del Maestro, las zonas edáficas 1 y 2 no presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ) (Tabla 3). Como en el caso de la CEe, el lote Del Maestro

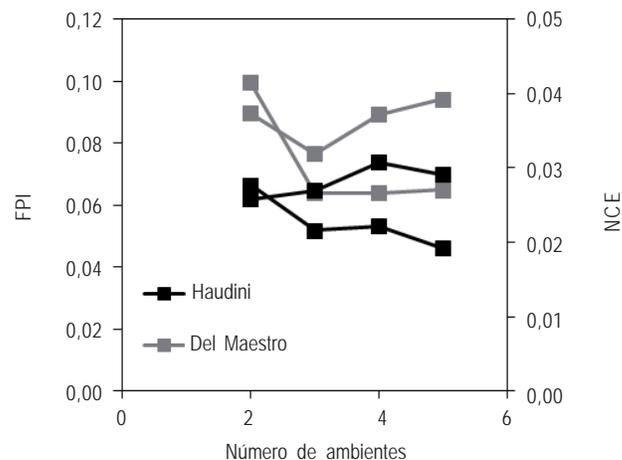


Figura 2. Índice de rendimiento difuso (FPI) y Clasificación entrópica normalizada (NCE) para los lotes Haudini y Del Maestro.  
Figure 2. Fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) at Haudini and Del Maestro fields.



Figura 3. Zonas edáficas delimitadas por análisis de conglomerados mediante el software MZA para los lotes Haudini (a) y Del Maestro (b).  
 Figure 3. Edaphic zones map delineated by MZA software at Haudini (a) and Del Maestro (b) fields.

Tabla 3. Media y desvío estándar de conductividad eléctrica del extracto (CEe), materia orgánica (MO), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y humedad gravimétrica para dos y tres zonas edáficas determinadas mediante el software MZA en los lotes Haudini y Del Maestro, respectivamente.  
 Table 3. Mean and standard deviation of electrical conductivity of the saturation extract (ECe), soil organic matter (SOM), moisture content, pH and cation exchange capacity (CEC) for two and three edaphic zones delineated by MZA software at Haudini and Del Maestro fields, respectively.

Lote	Zona edáficas	CEe	MO	pH	CIC	Humedad gravimétrica
		dS m <sup>-1</sup>	%		meq 100g <sup>-1</sup>	%
Haudini	Zona 1	0,56 ± 0,24 a	5,12 ± 0,08 a	5,93 ± 0,42 a	26,48 ± 0,94 a	17,87 ± 1,89 a
	Zona 2	1,41 ± 0,37 b	5,18 ± 0,15 a	7,49 ± 0,07 b	26,55 ± 1,64 a	17,99 ± 1,82 a
Del Maestro	Zona 1	1,29 ± 0,77 a	5,25 ± 0,09 a	6,48 ± 0,28 a	24,06 ± 4,24 a	18,60 ± 2,95 a
	Zona 2	2,41 ± 0,70 a	5,25 ± 0,09 a	7,43 ± 0,35 b	27,3 ± 1,68 ab	18,24 ± 1,32 a
	Zona 3	4,61 ± 1,16 b	5,28 ± 0,13 a	8,02 ± 0,49 c	32,81 ± 2,46 b	25,1 ± 0,91 b

Cifras seguidas por letras iguales en las columnas dentro de cada lote no difieren significativamente (nivel de significancia = 5%).

presentó valores más elevados de pH que Haudini (Tabla 3). En el ANVA de esta variable se detectaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3) entre las zonas edáficas en los dos lotes evaluados. La CIC y la humedad gravimétrica mostraron un comportamiento más inconsistente. En el lote Del Maestro se determinaron diferencias significativas entre las zonas edáficas (Tabla 3). En cambio, en el lote Haudini las determinaciones de estos parámetros edáficos no presentaron diferencias significativas entre los ambientes definidos mediante el análisis multivariado (Tabla 3). Por el contrario, en el análisis estadístico de la MO no se detectaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las zonas edáficas en los dos lotes evaluados (Tabla 3).

Dado que se recolectaron datos de un conjunto de variables de suelo para analizar la conveniencia de la delimitación en ambientes edáficos, resulta apropiado analizarlas

simultáneamente. Un método de análisis multivariado que sería de utilidad para este fin es el análisis discriminante. La Figura 4 muestra los dos primeros ejes canónicos de las muestras que explicaron el 97,6% de la variación entre grupos (95,3 y 2,3% los ejes canónicos 1 y 2, respectivamente). A partir de la primera función discriminante estandarizada por las covarianzas comunes puede verse que CEe y pH son las variables más importante para la discriminación sobre este eje (1,68 y 1,22, respectivamente). Por lo tanto, observaciones con valores altos para estas variables aparecerán situadas a la derecha del gráfico de dispersión. Los centroides en el espacio discriminante, o medias por grupo, muestran que la zona edáfica 3 del lote Del Maestro se opone a los otros grupos en el eje canónico 1 (Fig. 4), indicando que las diferencias en pH y CEe permiten discriminar observaciones de esta zona edáfica respecto del

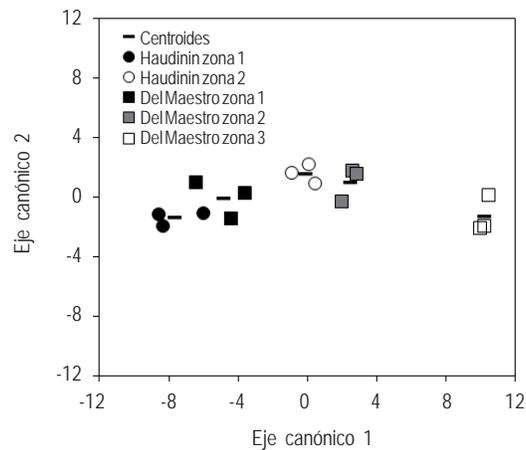


Figura 4. Análisis discriminante de las zonas edáficas de los lotes Haudini y Del Maestro en función de las propiedades de suelo evaluadas.  
Figure 4. Discriminant analysis of edaphic zones delineated by MZA software according to soil properties.

resto. La tasa de error aparente (estimador de la probabilidad de una mala clasificación) permitió determinar que el 100% de las muestras fueron clasificadas adecuadamente (datos no mostrados). Sin embargo, este resultado debe tomarse con precaución, por que las tasas de error aparente son poco precisas cuando el tamaño de muestra en cada población es pequeña.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta experiencia indican que la CEa y la elevación permitirían la caracterización de la variabilidad edáfica de los suelos de aptitud ganadera de la Pampa Deprimida, logrando delimitar ambientes edáficos que podrían tener diferente productividad potencial. Estas conclusiones son preliminares dado que, para corroborarlas, son necesarias futuras investigaciones en ambientes diferentes, e incluso en el mismo sitio en otra época del año, debido a la complejidad edáfica e hidrológica de los suelos de la Pampa Deprimida.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Ing. Agr. Ignacio Bibiloni por la colaboración para la recopilación de los datos. El presente trabajo es parte de la tesis de Doctorado en Ciencias Agrarias del Ing. Agr. Pablo Cicore en la Universidad Nacional de Mar del Plata y fue financiado por el INTA a través de los proyectos PNPA-11260714 PE y SUELOS 1134023 PE.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agnusdei, MG; SG Assuero; FA Lattanzi & MA Marino. 2010. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 88: 215-230.
- Batista, WB; MA Taboada; RS Lavado; SB Perelman & RJC León. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos de pastizal de la Pampa Deprimida, p. 113-129. *En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando JC León (M Oesterheld; MR Aguiar; CM Ghersa; JM Paruelo eds)*, Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Bosch Mayol, M; JL Costa; FN Cabria & VC Aparicio. 2012. Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Cienc. Suelo* 30: 95-105.
- Chapman, HD. 1965. Cation-exchange capacity. *In: C. A. Black (ed) Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties. Agronomy* 9: 891-901.
- Córdoba, M; C Bruno; JL Costa & M Balzarini. 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Comp. Electron. Agric.* 97: 6-14.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.* 46: 11-43.
- 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: 352-364.
- Costa, JL & P Godz. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudeste de la Pampa Deprimida. *Cienc. Suelo.* 17: 21-27
- Environmental System Research Institute. 2008. ArcGIS 9.0 - Arc Map vers.9.3. Disponible en: <http://www.esri.com/> Fecha último acceso: 18/11/12.
- Fraisse, CW; KA Sudduth & NR Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE* 44: 155-166.

- Fridgen, JJ; NR Kitchen; KA Sudduth; ST; Drummond; WJ Wiebold & CW Fraisse. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96: 100-108.
- Friedman, SP. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Comp. Electron. Agric.* 46: 45-70.
- Gambaudo, S; H Fontanetto; N Sosa; G Becaría; J Albrecht; H Boschetto & G Meroi. 2010. Aplicación de enmiendas de suelo por ambientes. Criterios a tener en cuenta para el cálculo de la dosis variable. 10° Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA. EEA Manfredi. pp 163-168.
- Geonics Limited. 2003. EM38-ground conductivity meter operating-manual. Mississauga, Ontario, Canada. 33 p.
- Guretzky, JA; KJ Moore; CL Burras & EC Brummer. 2008. Distribution of legumes along gradients of slope and soil electrical conductivity in pastures. *Agron. J.* 96: 547-555.
- Hossain, MB; DW Lamb; PV Lockwood & P Frazier. 2010. EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep Vertosol soils. *Comp. Electron. Agric.* 74: 100-109.
- Infostat, 2008. Infostat versión 2008. Manual del Usuario. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición. Editorial Brujas, Argentina. 336 p.
- INTA. 2014. Cartas de suelo de la República Argentina, Provincia de Buenos Aires. <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/finalidad.htm> Fecha ultimo acceso: 10/01/2014.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York, NY: Oxford University Press. 561 p.
- Kitchen, NR; KA Sudduth; DB Myers; ST Drummond & S Hong. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.* 46: 285-308.
- 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 & Tillage Res.* 106: 335-343.
- Pachepsky, YA; DJ Timlin; & WJ Rawls 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Paggi, M; NR Peralta; M Calandroni; F Cabria; JL Costa & V Aparicio. 2013. Identificación de series de suelos mediante el uso de sensores de conductividad eléctrica aparente en el sudeste bonaerense. *Cienc. Suelo* 31: 175-188.
- Peralta, N; M Franco Castro & JL Costa. 2011. Relación espacial entre variables de sitio y rendimiento para la delimitación de zonas de manejo mediante el uso de herramientas informáticas. In: Mendarozqueta, AR; Marciszack, MM; Groppo, MA (eds), 3° Congreso Argentino de Agroinformática. Córdoba, pp. 58-69.
- Peralta, NR & JL Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comp. Electron. Agric.* 99: 218-226.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini, & M Castro Franco. 2013b. Delineation of management zones with digital elevation models and soil depth. *Interciencia* 38: 418-424.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini & H Angelini. 2013a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 205-218.
- Rhoades, JD; NA Manteghi; PJ Shouse & WJ Alves. 1989. Soil electrical conductivity & soil salinity: New formulations & calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:433-439.
- Rhoades, JD; PA Raats & RJ Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 651-655.
- Rodriguez, A & E Jacobo. 2012. Manejo de pastizales naturales para una ganadería sustentable en la pampa deprimida 1a ed. - Buenos Aires: Fund. Vida Silvestre Argentina. 98 p.
- Rysan, L. & O Sarec. 2008. Research of correlation between electric soil conductivity and yield based on the use of GPS technology. *Res. Agr. Eng.* 54: 136-147.
- SAS Institute INC. 2007. SAS/STAT-JMP Users Guide. Release 7. Cary, NC.USA. 506 p.
- Serrano, J; J Peca; J Marques da Silva & S Shaidian. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Comp. Electron. Agric.* 73: 7-16.
- Serrano, J; S Shahidian & JR Marques da Silva. 2013. Small scale soil variation and its effect on pasture yield in southern Portugal. *Geoderma* 195-196: 173-183.
- Taboada, MA; RS Lavado; HA Svartz & ML Segat. 1999. Structural stability changes in a grazed grassland Natraquoll of the Flooding Pampa of Argentina. *Wetlands* 19: 50-55.
- Taboada, MA; G Rubio & R Lavado. 1998. The deterioration of tall wheatgrass pastures on saline sodic soils. *J Range Manag.* 51: 241-246.
- Trimble Navigation Limited. 2008. Disponible en: <http://www.trimble.com>. Fecha ultimo acceso: 10/06/13
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

