

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE UN SUELO TRATADO CON EFLUENTES GANADEROS

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF A SOIL TREATED WITH EFFLUENT FROM LIVESTOCK

Fabián Lemeillet¹, Claudia Sainato¹, Horacio Malleville¹, Lorna Carbó² y Alejandra Herrero²

¹Cátedra de Física, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires. Argentina.

²Area de Bases Agrícolas, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional de Buenos Aires. Argentina.

E-mail: lemeillet@agro.uba.ar

RESUMEN

La presencia de sustancias contaminantes en el suelo supone la existencia de efectos nocivos potenciales para el hombre, la flora y la fauna y, su posibilidad de transmitirse a medios como el agua subterránea, hace que ecosistemas alejados de la zona contaminada también puedan verse afectados. Los efluentes ganaderos son una fuente de contaminación originada por la escorrentía de estiércol desde granjas de producción animal intensiva. Estos son además utilizados como fertilizantes, sin conocerse sus efectos sobre el suelo. La geofísica, en particular el método geoeléctrico, mide la conductividad eléctrica del suelo (CE). A partir de ésta se pueden determinar zonas salinizadas. El objetivo del trabajo fue identificar contrastes en los valores de CE asociados a la presencia de sales de nitratos derivadas de la mineralización de efluentes ganaderos. El estudio consistió en un ensayo a pequeña escala sobre parcelas experimentales con un historial de fertilización con estiércol bovino. Se realizaron tomografías de resistividad eléctrica sobre cada parcela en dos instancias de diferente condición de humedad (Año 1 y Año 2). Los datos observados de CEa (conductividad eléctrica aparente) fueron invertidos mediante un software 2D, obteniéndose por cada perfil de parcela, un modelo de distribución de la CE verdadera del suelo. Los modelos permitieron observar que solo para el año de mayor humedad edáfica (Año 1) hubo una correlación positiva entre las cargas de estiércol y la CE de los modelos correspondientes. Para el análisis específico de la relación CE y sales de nitrato, dentro de cada parcela se muestrearon 4 sectores, se obtuvieron las concentraciones de nitratos y éstas fueron relacionadas con la CE de los modelos para los mismos sitios. Las mayores correlaciones también se produjeron en las parcelas del primer año. En el Año 2, caracterizado por una baja humedad del suelo y la presencia de zonas aéreas altamente resistivas, se observaron grandes contrastes de CEa dentro de las parcelas que habrían producido resultados ruidosos en los modelos, condicionando la eficiencia de la tomografía de resistividad eléctrica este año. Adicionalmente, al contarse con datos de CE_p (conductividad eléctrica en pasta de saturación) en la cabecera de cada parcela, se la comparó con la CE del modelo respectivo para ese mismo lugar. Para el Año 1, ambas variables correlacionaron con un R² del 85%, y para el Año 2, el ajuste fue moderado (55 %). La eficacia de las tomografías eléctricas para la detección de la salinidad derivada de la mineralización de la materia orgánica, está influenciada por el contenido hídrico y el agrietamiento del suelo, pero en líneas generales se puede señalar que la metodología puede contribuir a un diagnóstico del contenido de sales de nitrato.

Palabras Clave: geoeléctrica, efluentes ganaderos, contaminación, conductividad eléctrica, resistividad eléctrica, conductividad eléctrica en pasta de saturación.

ABSTRACT

The presence of contaminants in the soil implies the existence of potential adverse effects to humans, plants and animals, and the ability of them to be transmitted to groundwater, may also affect remote ecosystems. Livestock effluents are a source of diffuse pollution from runoff of manure from intensive animal production farms. Geophysics, particularly geoelectrical method, measures the electrical conductivity (EC). With EC, salinity areas may be determined. The objective was to identify contrasts of EC values associated with the presence of nitrate salts derived from livestock effluent mineralization. The study was a small scale trial on experimental plots with a previous fertilization with cattle manure. Electrical resistivity tomographies were carried out at the plots in two instances with different soil moisture condition (Year 1 and Year 2). The observed data of ECa (apparent electrical conductivity) were processed using a software 2D, obtaining for each plot a model of distribution of true soil EC. The models allowed observing that only for the year of higher edaphic humidity (Year 1) there was a positive correlation between the manure loads and the EC of the corresponding models. For the specific analysis of the EC and nitrate salts relationship, within each plot four sectors were sampled, nitrate concentrations were obtained and these were related to EC models for the same sites. The highest correlations also occurred in the first year plots. In Year 2, characterized by low soil moisture and the presence of highly resistive air zones, there were large contrasts of CEa within the plots that would have produced noisy results in the models, conditioning the efficiency of electrical resistivity tomography, this year. Additionally, when CEp (electric conductivity in saturation paste) data were taken at the head of each plot, it was compared with the CE of the respective model for that same site. For Year 1, both variables correlated with R^2 of 85%, and for Year 2, the adjustment was moderate (55%). The efficacy of electric tomography for the detection of salinity from organic matter mineralization is influenced by water content and soil cracking, but in general terms it can be pointed out that the methodology can contribute to a diagnosis of the content of nitrate salts.

Keywords: geoelectrical method, livestock effluents, pollution, electrical conductivity, electrical resistivity, electrical conductivity in saturated paste.

INTRODUCCION

La intensificación de los sistemas ganaderos resulta en el incremento de los flujos de energía y de nutrientes y en riesgos de contaminación. Los animales excretan al ambiente entre 60 y 80% del nitrógeno (N) y el fósforo (P) que ingieren, a través de la orina y las heces. Los procesos de contaminación del suelo vinculados con la producción animal intensiva provienen de la acumulación de excretas en corrales de alimentación, o bien de su aplicación excesiva como fertilizante orgánico en los cultivos. Los principales contaminantes en estos sistemas confinados son el N y el P, y su acumulación puede afectar la calidad del suelo y otros recursos, como el agua (Herrero y Gil, 2008).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) se refiere a los efluentes ganaderos, como una fuente de contaminación difusa que constituye un grave peligro para la calidad del agua subterránea, y señala a la lixiviación por nitratos como la causa principal de esta problemática. (FAO, 1997).

Las propiedades eléctricas de los suelos están fuertemente influenciadas por su porosidad y grado de saturación, y además, dependen de la salinidad del agua contenida en los poros. Por este motivo, se han desarrollado métodos geofísicos de alta resolución para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral del subsuelo, dando lugar a una creciente disciplina conocida como "Near Surface Geophysics". Para este tipo de estudios, es especialmente efectiva la tomografía de resistividad eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectrónicos clásicos como el sondeos eléctricos verticales (SEV) (Tapias et al, 2005).

A partir del uso de estos métodos en investigaciones arqueológicas, la Ciencia del Suelo comenzó a acrecentar su interés en la prospección eléctrica subsuperficial (Samouellian et al.,

2005). En este sentido, Losinno et al. (2003) analizaron la CE en la interfase agua dulce-agua salada de los acuíferos más superficiales en la zona agrícola-ganadera de Pergamino (Argentina).

Entre los trabajos de contaminación de agua subterránea por actividad ganadera intensiva, se destacan los de Drommerhausen et al. (1995) y Sainato et al. (2006a), quienes determinaron los límites de zonas contaminadas por medio de la detección de valores anómalos de CE. En el primer caso, se utilizó un medidor de conductividad electromagnética que estudió la contaminación en ocho tambos de cinco condados en Georgia (USA), y donde se encontró una alta incidencia de nitratos en agua de pozo. En el segundo, se realizaron tomografías de resistividad eléctrica en dos tambos (Venado Tuerto y Carmen de Areco, Argentina) para detectar anomalías de CE que estuvieran relacionadas con un proceso de contaminación por efluentes, tanto en la zona no saturada como en el agua subterránea, hallándose que la salinidad estuvo asociada a un alto contenido de nitratos, fosfatos y sulfatos.

Entre la variedad de estudios de este tipo aplicados a la zona superficial de la tierra (tanto la zona no saturada como el acuífero freático) se encuentran los de Corwin et al. (2003), quienes elaboraron protocolos con valores de conductividad eléctrica (CE) destinados a evaluar la calidad de suelos sódico-salinos en el centro de California. Por su parte, Valente et al. (2012) correlacionaron la CE con diversas propiedades de un suelo arcilloso de uso agrícola en el estado de Minas Gerais, Brasil, con el objeto de ensayar la geoelectrica como método de interpretación de la variabilidad de las cualidades físicas y químicas del suelo.

La Conductividad Eléctrica Aparente (CEa) fue ampliamente utilizada para caracterizar espacialmente la salinidad y nutrientes en el suelo (p.e., NO_3^-), también propiedades relacionadas con la textura, con la densidad aparente (tal como la compactación), con la materia orgánica, y con otras propiedades del suelo (Corwin y Lesch, 2005).

El término "CEa" que emplea la Ciencia del Suelo, se refiere a la conductividad eléctrica de un sistema no homogéneo influenciado por el conjunto de propiedades edáficas como la presencia de arcilla, la porosidad, la estructura, y también las sustancias contaminantes en la solución del suelo (Sainato et al., 2006b). Por lo tanto, esta ciencia, a diferencia de la Geofísica, no solo adopta dicho término para referirse a los datos eléctricos experimentales (a campo), sino también, a los valores reales de la CE del suelo resultantes de su modelización. Sin embargo, para posibilitar una lectura en términos de la geofísica, distinguiremos en este trabajo a la "CEa" como la conductividad eléctrica experimental, y a la CE o conductividad eléctrica real del suelo, como la surgida de la modelización de los datos experimentales.

Usualmente, para medir la salinidad del suelo superficial, se utiliza la técnica de laboratorio llamada CE en pasta de saturación (CEp), que requiere del muestreo del suelo, su transformación en una pasta saturada con agua destilada en un recipiente, y la utilización de un sistema de electrodos, Page (1982). Este parámetro suele ser utilizado en la clasificación de las aguas para riego según el grado de salinidad del suelo (Sainato et al, 2006b). Así, en la agricultura, la adopción de los métodos geofísicos eléctricos fue mayormente motivado por la necesidad de obtener mediciones confiables, fáciles y rápidas de salinidad, evolucionando hasta la actualidad, donde la CE se ha convertido en una herramienta para la caracterización espacial de la variabilidad de varias de las propiedades del suelo (Corwin, 2008). Estos métodos permiten además, realizar sondeos exploratorios para un diseño óptimo del muestreo de suelos, utilizando la CE como factor de bloque de un muestreo tradicional (Johnson et al., 2005).

Resulta importante evaluar la relación existente entre las propiedades asociadas con la salinidad del suelo y la CE obtenida por métodos exploratorios, de forma de evitar muestreos muy intensivos y de costosa ejecución. Si bien la caracterización de la salinidad por medio de la CE fue abordada por un amplio grupo de autores, entre ellos Corwin y Lesch (2005), Neely et al. (2016) y Bänninger et al. (2009), existe un área de vacancia en el conocimiento de su relación con la presencia de sales provenientes de la mineralización de los efluentes de la actividad ganadera intensiva. Además, no son habituales los estudios a pequeña escala, como puede ser la caracterización de propiedades del suelo en parcelas experimentales en condiciones medianamente controladas.

El objetivo de este trabajo fue estudiar a pequeña escala y con parcelas experimentales con un historial de fertilización con efluente bovino (estiércol), el uso de la metodología geoelectrica, más precisamente, tomografías de resistividad eléctrica, para identificar contrastes de valores de CE asociados a la presencia de sales derivadas de la mineralización de la materia orgánica, haciendo énfasis en las sales de nitrato.

De esta manera, se buscó investigar la contribución de la metodología de exploración geoelectrica como herramienta de diagnóstico rápido de la contaminación del suelo, proporcionando a su vez información que pudiera servir de base para aplicar procedimientos de análisis más exhaustivos.

MATERIALES Y METODOS

El ensayo tuvo lugar en un lote de campo ubicado en el predio de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Buenos Aires, en la Capital Federal, a los 34° 35'34" S y a los 58° 28' 52" O, donde se disponía de cuatro parcelas de un suelo Argialbol de textura franco-arcillosa, que habían formado parte de un experimento a largo plazo de fertilización con estiércol para el rendimiento de especies forrajeras; de manera que, la salinización alcanzada en estas parcelas, fue caracterizada mediante una exploración geoelectrica, de tipo tomografía de resistividad eléctrica.

Cada parcela medía 10 m de largo por 2 m de ancho, con 1 m de distancia entre ellas como zona de separación (Fig.1). Una nueva parcela de iguales características y sin antecedentes de fertilización fue adicionada como testigo, conformando un total de 5 (cinco) parcelas.

El estudio se inició mediante tomografías de resistividad eléctrica sobre las 5 parcelas el 9 de junio de 2009, instancia a la que hemos denominado "Año 1", y continuó con una segunda serie de sondeos el 29 de diciembre de 2010 (Año 2). Debido a que el método geoelectrico es altamente dependiente del contenido hídrico (Archie, 1942; Samouellian et al. 2005), se buscaron estaciones climáticas disímiles, que permitieran ensayar la metodología con diferentes contenidos de humedad en la parte superficial del suelo.

Un sondeo geoelectrico consiste en medir la resistividad aparente del suelo (ρ_a) al flujo de una corriente eléctrica a través de cuatro electrodos colocados en línea en la tierra (Corwin, 2008). Con el objeto de realizar las tomografías de resistividad eléctrica para cada parcela, se utilizó un resistivímetro SARIS (SCINTREX), que hace circular la corriente de intensidad "i" entre los electrodos de corriente A y B; y que mide a través de los electrodos M y N la diferencia de potencial originada (ΔV). Con un factor geométrico K que depende de la ubicación de los electrodos, se obtiene la pseudosección de resistividades aparentes del subsuelo en estudio (Losinno et al. 2008). La ec. 1 describe lo antedicho para la determinación de la resistividad aparente:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad (1)$$

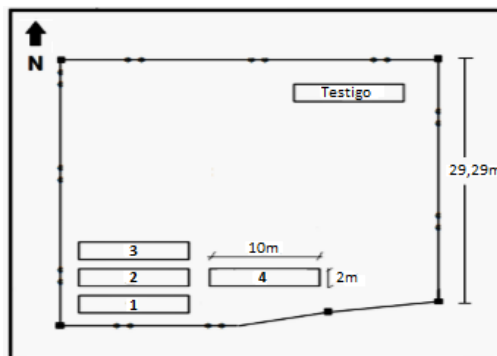


Figura 1. Distribución de las parcelas (1,2,3,4, testigo) con orientación O-E en el lote de la Fac. de Veterinaria (UBA).

Figure 1. Distribution of the plots (1,2,3,4, control site) facing W-E, in a plot at the Faculty of Veterinary Medicine (UBA).

La configuración de electrodos empleada en el trabajo fue la dipolo-dipolo (Weinzettel et al. 2009). Para cada tomografía se utilizó una cantidad de 30 electrodos en línea, con una longitud

total de 6 metros y separación entre ellos de 20 cm. Se emplearon 6 niveles de sondeo (n = 6) produciendo una abertura máxima (valor de separación máximo entre electrodos de corriente y voltaje) de 1.2 m.

Los datos de ρ_a obtenidos de esta forma, fueron procesados mediante el software de inversión DCIP2D (UBCGIF) (University of British Columbia – Geophysical Inversion Facility), desarrollado en base al trabajo de Oldenburg y Li (1994), obteniéndose los modelos de resistividad verdadera (ρ) del suelo correspondientes a cada parcela (5 modelos en total). Este tipo de modelos es el resultado de una rutina de inversión por cuadrados mínimos que sigue el programa, dando por resultado la distribución bidimensional de resistividades del subsuelo. La metodología consiste en encontrar un modelo de distribución de ρ_a (predicha) que sea lo más cercana posible a los datos experimentales (observados) obtenidos en el campo. La función misfit (ϕ) que se minimiza según los procedimientos estadísticos standard está dada por la ec. (2):

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho^{pre} - \rho^{obs}}{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (2)$$

Donde $\rho^{pre} - \rho^{obs}$ es la diferencia entre la resistividad observada (aparente) y la predicha, ε_i es el error en la medición, y n el número de datos.

Se consideró un error del 5% para cada dato, teniendo en cuenta cálculos estimativos de las desviaciones standard de los datos observados; y el valor de misfit para el modelo final corresponde (según el procedimiento de Oldenburg y Li, 1994) a una variable χ^2 con un valor esperado de $N \times \text{chifact}$, donde N es el número de datos y chifact es un factor de convergencia. Se utilizó como modelo inicial el promedio de las resistividades aparentes medidas en el campo.

En los primeros 40 cm de profundidad se intensificó el número de celdas para poder describir mejor la zona de muestreo. En la dimensión lateral se colocó 1 nodo cada 2 electrodos. Lejos de la zona de interés de medición, las celdas aumentaron su tamaño en un factor 2 o 3. En todo el diseño de la malla se siguieron las recomendaciones del tutorial del programa de cálculo.

Una vez obtenidos los modelos para cada parcela, los datos de resistividad fueron convertidos a valores de conductividad eléctrica "CE" (inversa de la resistividad).

A los efectos de relacionar los valores de CE del modelo con la presencia de nitratos en sectores específicos de cada parcela, luego de cada sondeo se extrajeron con barreno 4 muestras de suelo (desde el origen a 1 m, 2.5m, 3.5m y 5m) a lo largo de la línea que ocuparon los electrodos (ver figura 2). La profundidad de muestreo fue de 40 cm. Las sales de nitratos fueron analizadas químicamente y se determinaron sus concentraciones por reacción colorimétrica y posterior medición en espectrofotómetro (Marbán, 2005).

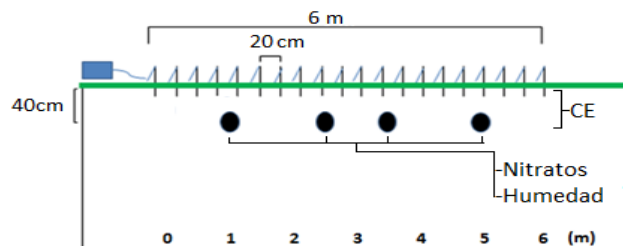


Figura 2: Esquema general del perfil de electrodos en una parcela, indicando en negro los cuatro sectores de muestreo de suelo, a 40 cm de profundidad, de donde se analizaron la concentración de nitratos y la humedad gravimétrica. La CE se obtuvo de los modelos derivados de las tomografías de resistividad eléctrica.

Figure 2: General scheme of the profile of electrodes at a plot indicating the four sectors of soil sampling, at a depth of 40cm, where concentration of nitrates and gravimetric humidity were analyzed. The CE was obtained from the models of electrical resistivity tomographies.

La ecuación 3 es la Ley de Archie (Archie, 1942), la cual describe la dependencia de la

resistividad del suelo (ρ_o) con la resistividad eléctrica del fluido que satura los poros (ρ_f) y la porosidad ϕ (m es un exponente de cementación).

$$\rho_o = \rho_f \cdot \phi^{-m} \quad (3)$$

En el caso nuestro (medios no saturados) la expresión de Archie es como la describen Frohlich y Parke (1989) (ecuación 4); donde ρ_b es la resistividad del suelo, a , m y n son constantes para el tipo de sedimento del medio, ρ_w es la resistividad del agua en los poros, ϕ es la porosidad y S el contenido de agua.

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \quad (4)$$

El predio donde se encontraban las parcelas era de aproximadamente 30 x 30 metros, lo suficientemente pequeño como para inferir que no había diferencias sensibles en la porosidad dentro del terreno, con lo cual, la resistividad encontrada en cada parcela podía ser explicada fundamentalmente por las variaciones de salinidad y humedad en el suelo.

Dado que el nivel de humedad es condicionante de la CE del suelo, ya que el agua se comporta como un electrolito donde la CE de la solución depende del número y movilidad de los iones (Keller, 1988), se determinó además la humedad gravimétrica (Page, 1982) de muestras obtenidas en los mismos cuatro sectores referidos anteriormente (Fig. 2).

Por último, como se contaba con valores de Conductividad Eléctrica en Pasta de Saturación (CEp) en la cabecera de cada parcela y a los 40cm de profundidad, se la comparó con la CE de los modelos para el mismo sector. La CEp es una técnica de laboratorio de Física de Suelos empleada para medir la salinidad; lo que requiere de una muestra de suelo y su transformación en una pasta saturada con agua destilada en un recipiente. El agua es extraída mediante una bomba de vacío y su conductividad eléctrica es medida con un conductímetro (Page, 1982).

El análisis de los resultados correspondió en primer lugar, a comparar los cinco modelos de CE entre sí, teniendo en cuenta la carga original de estiércol que había recibido cada parcela.

El siguiente paso consistió en un análisis puntualizado de la relación de la CE en los modelos y las sales de nitrato, en los cuatro sectores muestreados de cada parcela (mismos sectores en los modelos), a los 40 cm de profundidad.

Por último, se comparó la CE con la CEp, en un sector específico dentro de cada parcela/modelo, donde se disponía de un valor de CEp de manera puntualizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presenta el resumen de la cantidad de estiércol aplicado durante el experimento antecesor según dosis equivalente a kg de nitrógeno por hectárea.

Para la zona de estudio, los valores de precipitación y temperaturas próximos a los ensayos se muestran en la tabla 2. En esta se observa que para el Año 2, las condiciones climáticas fueron diferentes a las del primero, es decir, hubo temperaturas sensiblemente más altas en los días previos al ensayo, tanto medias como medias máximas, y además se produjo una menor precipitación.

Las figuras 3 a 7 muestran en la parte superior, los modelos de conductividad eléctrica obtenidos en la inversión de los datos de ρ_a para cada parcela y cada año de análisis; y en la parte inferior, las pseudosecciones de CE aparente observada y predicha por los modelos; junto con los valores del misfit ϕ .

En general, las distribuciones de CE de las pseudosecciones son similares, indicando un buen ajuste en la inversión, si bien en el segundo año los valores de misfit son más altos, probablemente debido a una baja condición de humedad del suelo y presencia de grietas que aportaron datos ruidosos durante la inversión.

Se realizó una estimación de la profundidad de investigación para la parcela más conductora, según el algoritmo de Oldenburg y Li (1999), resultando en alrededor de 50-60cm.

En las figuras 3 a 7, los 4 sectores de los modelos donde se analiza la relación entre nitratos y CE, corresponden a la línea de los 40 cm de profundidad y su intersección con las distancias de

muestreos. Para estos puntos se indican los valores de CE (S/m), así como las concentraciones de nitratos (mg de N por kg de suelo) y además la humedad gravimétrica (%).

	AÑOS			TOTAL
	2006	2007	2008	
Parcela 1	100kg	100kg	100kg	300kg
Parcela 2	100kg	100kg	150kg	350kg
Parcela 3	0kg	0kg	150kg	150kg
Parcela 4	0kg	200kg	200kg	400kg

Tabla 1: Resumen de la frecuencia y cantidad de estiércol aplicado por parcela y expresado según dosis equivalente a kg N/ha.

Table 1: Summary of the frequency and amount of manure applied per plot and expressed as equivalent dose to kg N/ha.

	Precipitación media de los 30 días previos al ensayo	Temperatura media de los 15 días previos	Temperatura media máxima de los 10 días previos al ensayo
AÑO 1 (9/6/2009)	82.66 mm	12.05 °C	15.21 °C
AÑO 2 (29/12/2010)	59.82 mm	26.50 °C	32.85 °C

Tabla 2: Comparación de precipitación y temperaturas entre los dos períodos de medición (Año 1y Año 2). Fuente: Meteored (2016).

Table 2: Comparison of precipitation and temperatures between the two measurement periods (Year 1 and Year 2).

Al comparar la tabla 1 (cargas de estiércol) con los modelos de las figuras 3 a 7, se observa para el Año 1, una relación positiva entre las cargas aplicadas a las parcelas y la CE en los modelos correspondientes. Puede visualizarse en los modelos (para todo el perfil) un incremento de CE (identificada en el rango del marrón al rojo) a medida que una parcela recibe mayor carga de estiércol. El orden creciente tanto de estiércol como CE es: Testigo - Parcela 3 - Parcela 1 - Parcela 2 -Parcela 4. De esta manera, la totalidad de las sales inorgánicas (entre las que se encuentran los nitratos) producto de la mineralización de la materia orgánica (estiércol), estarían contribuyendo al aumento generalizado de CE en las parcelas, y que se expresa en los modelos.

Al tratarse de parcelas pequeñas y cercanas, es de esperar humedades similares entre sí (ver valores de humedad gravimétrica en las figuras de 3 a 7). Y siendo que la porosidad y el contenido de arcilla se pueden suponer uniformes en el terreno, la diferencia de CE entre parcelas, respondería preponderantemente a la variación en la concentración de las sales mineralizadas.

Para el Año 2, la relación recién descrita no se verifica (Fig. 3 a 7), donde es probable que la escasa humedad del suelo y la presencia de espacios aéreos altamente resistivos como grietas, visibles durante el ensayo, e identificadas en azul en los modelos, habrían proporcionado una alta heterogeneidad en el suelo de las parcelas, condicionando la eficiencia del método geoelectrico, expresándose en un misfit más alto este año para el ajuste de los datos experimentales.

Año 1 – Análisis de la relación nitratos-CE (a 40 cm de profundidad)

Para el Testigo, las anomalías de menor CE (0.01-0.02 S/m) son coincidentes con menores

contenido de nitratos en la parcela (9 mg/kg). Similarmente, los valores de CE más altos (0.04 – 0.03 S/m) corresponden a concentraciones más altas (12 y 14 mg/kg).

En la parcela 1, esta tendencia se cumple para tres de los cuatro puntos (no se verifica en el extremo derecho). Así, en la zona central, las concentraciones de 20 y 19 mg/kg se corresponden con mayores valores de CE (0.04 y 0.03 S/m respectivamente), y en el extremo izquierdo, una baja en los nitratos a 10 mg/kg, muestra una reducción a 0.02 S/m.

En la parcela 4, el comportamiento es análogo a lo anterior: 33 mg/kg de nitratos se relacionan con 0.09 S/m (valores más altos tanto de CE como de Nitratos), 24 mg/kg con 0.05 S/m, y las menores concentraciones (15 y 14 mg/kg) con las menores CE (0.04 S/m).

En el caso de la parcela 2 y 3, no hay una correlación clara entre ambas variables. Por ejemplo en la 2, en el sector derecho, una concentración de nitratos sensiblemente mayor dentro de la parcela (44 mg/kg) no se corresponde con la CE más alta del modelo. Similarmente en la parcela 3, un bajo contenido de nitratos (8 mg/kg) no es correspondido por la menor CE detectada. Lo mismo sucede con la concentración más alta dentro de la parcela 3, donde los 39 mg/kg no responden a la mayor CE.

TESTIGO

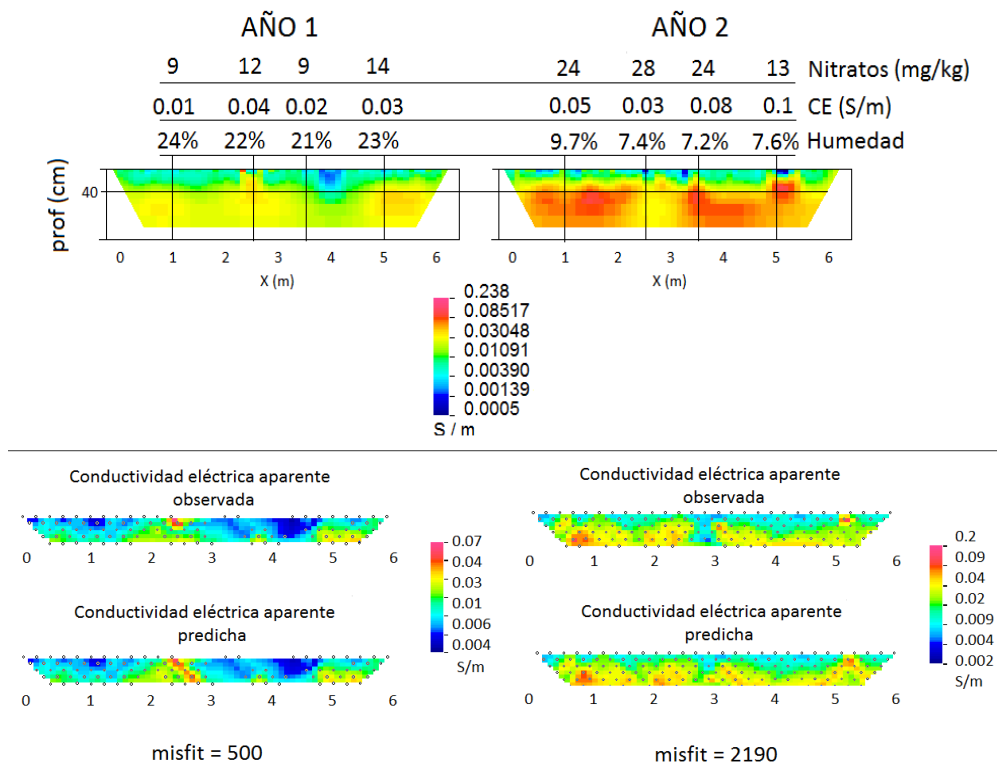


Figura 3. Parcela Testigo. Parte superior: Modelos de CE (conductividad eléctrica verdadera) para ambas instancias de medición (año 1 y año 2). Los 4 sectores donde se comparan los nitratos con la CE, corresponden a las intersecciones entre la horizontal de 40cm de profundidad y las 4 verticales equivalentes a las distancias de muestreo desde el origen (1m, 2.5m, 3.5m y 5m). Para cada punto se indican la CE del modelo, la humedad gravimétrica y la concentración de nitratos. Parte inferior: CE aparente observada y predicha asociada a cada uno de los modelos (incluyéndose el misfit).

Figure3. Test Plot. Upper part: models of EC (real electrical conductivity) for both instances of measurement (first and second year). The 4 sectors where nitrates are compared with the EC, correspond to the intersections between the 40cm deep line and the 4 vertical lines for the distances from the origin (1m, 2.5m, 3.5m and 5m). For each point the model EC, gravimetric humidity and nitrate concentration are indicated. Bottom: Observed and predicted EC associated to each of the models (including misfit).

PARCELA 1

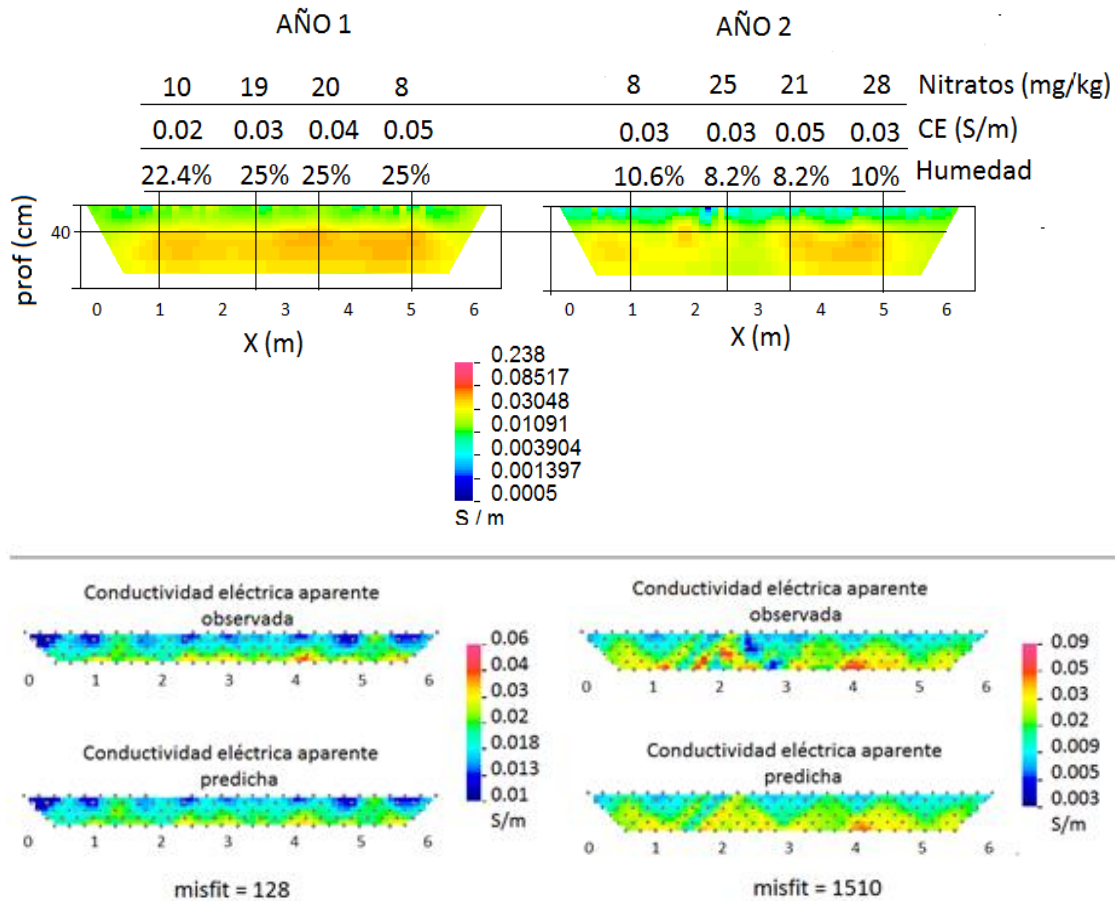


Figura 4. Parcela1. Parte superior: Modelos de CE (conductividad eléctrica verdadera) para ambas instancias de medición (año 1 y año 2). Los 4 sectores donde se comparan los nitratos con la CE, corresponden a las intersecciones entre la horizontal de 40cm de profundidad y las 4 verticales equivalentes a las distancias de muestreo desde el origen (1m, 2.5m, 3.5m y 5m). Para cada punto se indican la CE del modelo, la humedad gravimétrica y la concentración de nitratos. Parte inferior: CE aparente observada y predicha asociada a cada uno de los modelos (incluyéndose el misfit).

Figure 4. Plot 1. Upper part: models of EC (real electrical conductivity) for both instances of measurement (first and second year). The 4 sectors where nitrates are compared with the EC, correspond to the intersections between the 40cm deep line and the 4 vertical lines for the distances from the origin (1m, 2.5m, 3.5m and 5m). For each point the model EC, gravimetric humidity and nitrate concentration are indicated. Bottom: Observed and predicted CE associated to each of the models (including misfit).

PARCELA 2

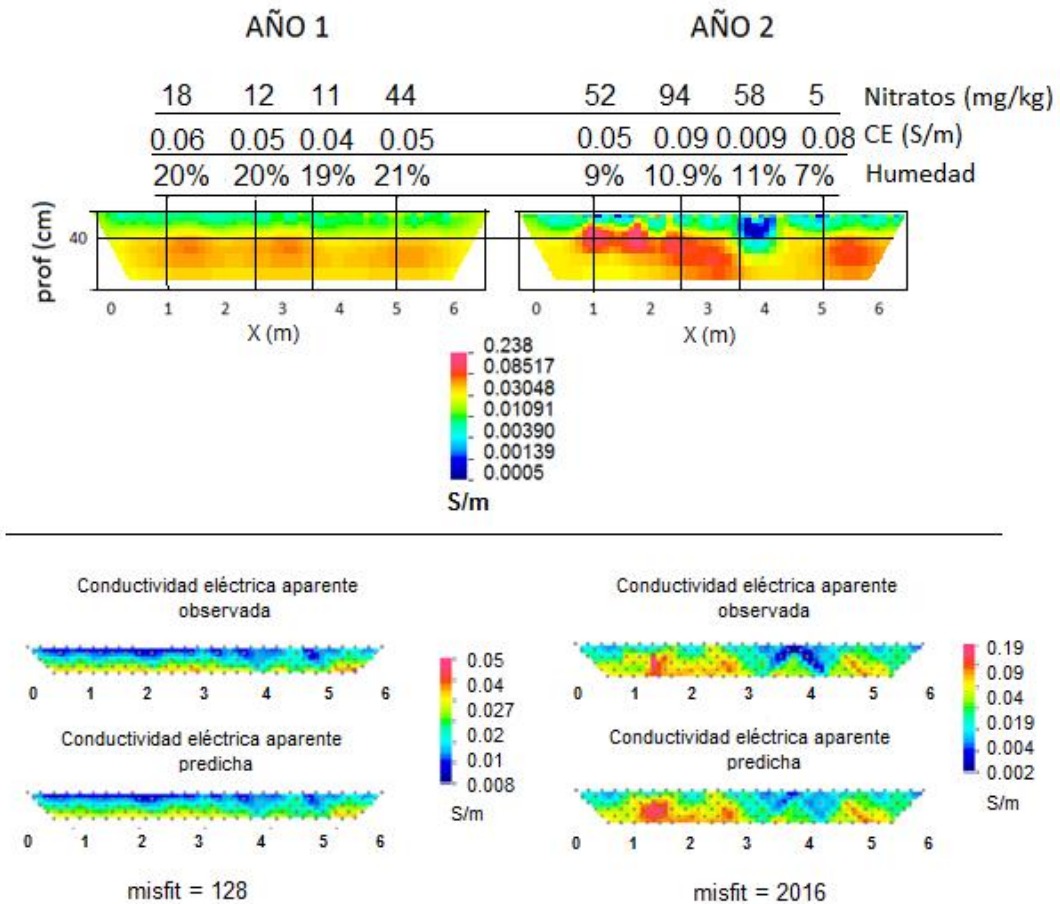


Figura 5. Parcela2. Parte superior: Modelos de CE (conductividad eléctrica verdadera) para ambas instancias de medición (año 1 y año 2). Los 4 sectores donde se comparan los nitratos con la CE, corresponden a las intersecciones entre la horizontal de 40cm de profundidad y las 4 verticales equivalentes a las distancias de muestreo desde el origen (1m, 2.5m, 3.5m y 5m). Para cada punto se indican la CE del modelo, la humedad gravimétrica y la concentración de nitratos. Parte inferior: CE aparente observada y predicha asociada a cada uno de los modelos (incluyéndose el misfit).

Figure 5. Plot 2. Upper part: models of EC (real electrical conductivity) for both instances of measurement (first and second year). The 4 sectors where nitrates are compared with the EC, correspond to the intersections between the 40cm deep line and the 4 vertical lines for the distances from the origin (1m, 2.5m, 3.5m and 5m). For each point the model EC, gravimetric humidity and nitrate concentration are indicated. Bottom: Observed and predicted CE associated to each of the models (including misfit).

PARCELA 3

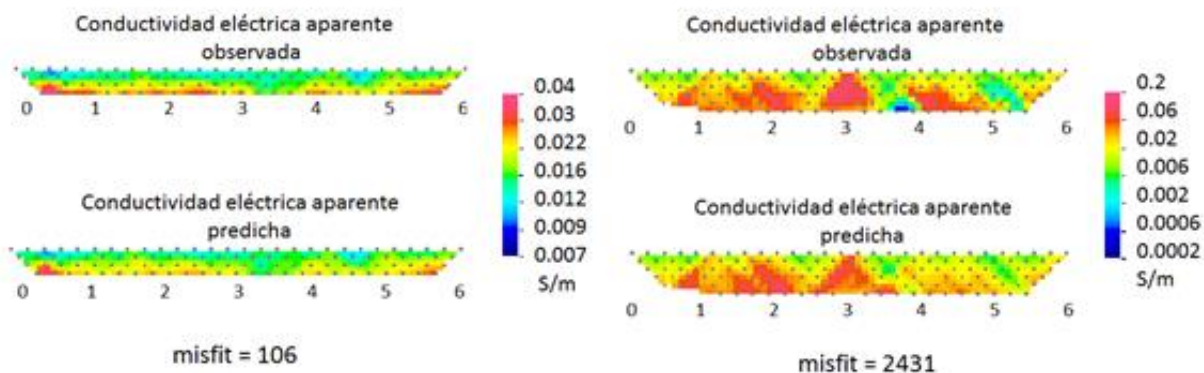
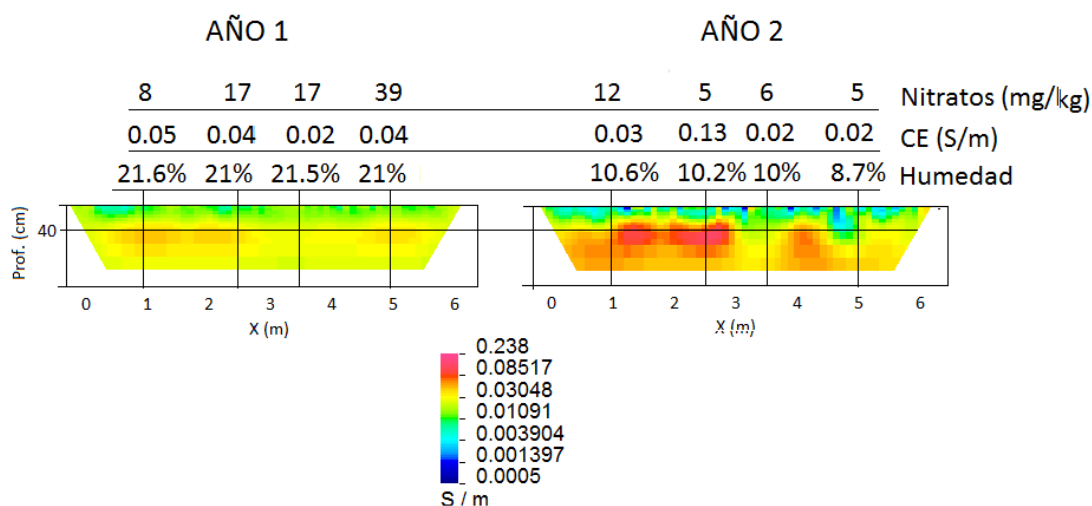


Figura 6. Parcela3. Parte superior: Modelos de CE (conductividad eléctrica verdadera) para ambas instancias de medición (año 1 y año 2). Los 4 sectores donde se comparan los nitratos con la CE, corresponden a las intersecciones entre la horizontal de 40cm de profundidad y las 4 verticales equivalentes a las distancias de muestreo desde el origen (1m, 2.5m, 3.5m y 5m). Para cada punto se indican la CE del modelo, la humedad gravimétrica y la concentración de nitratos. Parte inferior: CE aparente observada y predicha asociada a cada uno de los modelos (incluyéndose el misfit).

Figure 6. Plot 3. Upper part: models of EC (real electrical conductivity) for both instances of measurement (first and second year). The 4 sectors where nitrates are compared with the EC correspond to the intersections between the 40cm deep line and the 4 vertical lines for the distances from the origin (1m, 2.5m, 3.5m and 5m). For each point the model EC, gravimetric humidity and nitrate concentration are indicated. Bottom: Observed and predicted CE associated to each of the models (including misfit).

PARCELA 4

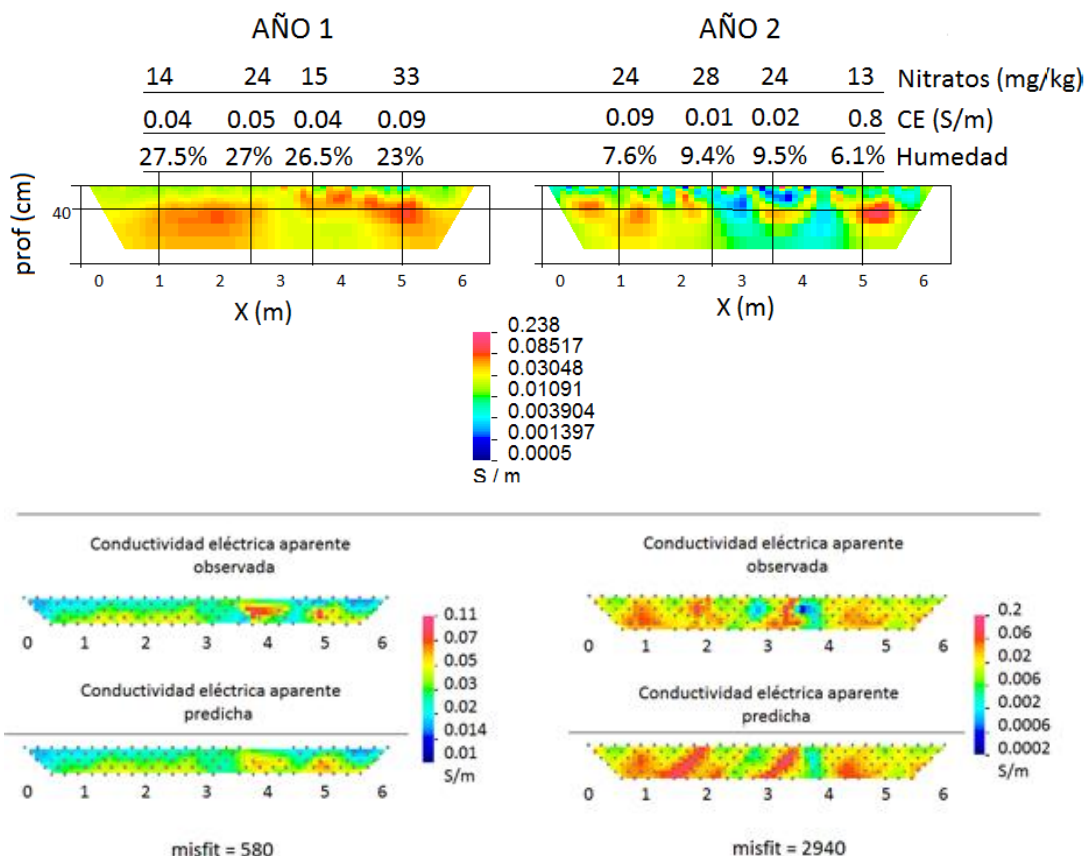


Figura 7. Parcela4. Parte superior: Modelos de CE (conductividad eléctrica verdadera) para ambas instancias de medición (año 1 y año 2). Los 4 sectores donde se comparan los nitratos con la CE, corresponden a las intersecciones entre la horizontal de 40cm de profundidad y las 4 verticales equivalentes a las distancias de muestreo desde el origen (1m, 2.5m, 3.5m y 5m). Para cada punto se indican la CE del modelo, la humedad gravimétrica y la concentración de nitratos. Parte inferior: CE aparente observada y predicha asociada a cada uno de los modelos (incluyéndose el misfit).

Figure 7. Plot 4. Upper part: models of EC (real electrical conductivity) for both instances of measurement (first and second year). The 4 sectors where nitrates are compared with the EC correspond to the intersections between the 40cm deep line and the 4 vertical lines for the distances from the origin (1m, 2.5m, 3.5m and 5m). For each point the model EC, gravimetric humidity and nitrate concentration are indicated. Bottom: Observed and predicted EC associated to each of the models (including misfit).

Año 2 – Análisis de la relación nitratos-CE a 40 cm de profundidad

Una característica distintiva de este año es el bajo contenido de humedad en las parcelas (ver los valores en los modelos de las figuras 3 a 7, y los de precipitaciones y temperatura en la tabla 2). Es notorio en los modelos, en comparación con el Año 1, zonas de CE muy heterogéneas dado por sectores altamente resistivos (identificados en azul), atribuibles a espacios aéreos (grietas), debido al desecamiento de la zona más superficial de la tierra.

Al analizar la relación nitratos-CE en los 4 sectores de referencia, sólo es factible encontrar alguna dependencia en los sectores del modelo más homogéneo en términos de CE. En el caso del Testigo por ejemplo, no hay una correspondencia entre la mayor CE (0.1 S/m) y la más alta concentración de nitratos (28 mg/kg), como tampoco entre la CE más baja (0.03 S/m) y los menores contenidos de la sal (13 mg/kg).

En la parcela 2, la relación nitratos-CE es algo mayor. Hay un aumento de la CE junto a los

nitratos en los sectores de CE más homogéneos del modelo. Así, para una CE de 0.09 S/m, el contenido de nitratos es de 94 mg/kg; y una baja en los nitratos de 52 mg/kg, lleva a una reducción a 0.05 S/m.

En la parcela 4, la falta de correlación prevalece, donde el valor más alto de CE (0.8 S/m) se corresponde, contrariamente, con el más bajo de nitratos (13 mg/kg). Puede notarse en este modelo que dicho sector se ubica en una zona muy heterogénea de CE, con lo cual se acrecienta por un lado, la probabilidad de que el sitio de muestreo no haya coincidido exactamente con el punto de CE identificado en el modelo; y por el otro, que al presentarse sectores muy resistivos, la inversión de los datos haya producido en las zona más conductora contigua, una conductividad eléctrica muy alta, que no resulta ser demasiado confiable. Ya en el centro de la parcela 4, los sitios de muestreo se ubican en zonas de alta resistividad, probablemente por mayor presencia de aire, lo que directamente dificulta evaluar la relación Nitratos-CE.

Las altas temperaturas y evaporación previas a esta instancia de medición, habrían contribuido a un menor contenido de humedad en el perfil y a un mayor agrietamiento del suelo. Como el método geoelectrico es altamente dependiente de la humedad para la conducción electrolítica (Sudduth et al., 2005, Corwin y Lesch, 2005, Kühn et al., 2008, Allred, 2008) y además el suelo se encontraba con una gran cantidad de grietas, la variabilidad lateral producida en la CE afectó la interpretación de los resultados este año, reflejado en los altos valores de misfit.

En el resto de las parcelas (1 y 3), el análisis lateral de cómo varía la CE en respuesta a la presencia de nitratos, tampoco muestra una tendencia positiva para este año.

Altos contrastes de CE dentro de un mismo modelo no son exclusivos del Año 2. En el Año 1, aunque con menor frecuencia, se observan también algunas inconsistencias por probables datos ruidosos considerados por el programa durante la convergencia, tal como sucede con el Testigo, a los 4 metros desde el origen, donde el valor de CE es 0.02 S/m (50 ohmm de resistividad), no compatible con un suelo franco arcilloso y una humedad del 20%.

Respecto del aumento que se produce en la concentración de nitratos entre el Año 1 y el Año 2, esto respondería al proceso de mineralización a través del tiempo. Es sabido que en el caso de la aplicación de estiércol en cultivos, sólo una parte del contenido total de nutrientes (nitratos, sulfatos, cloruros, etc) se libera por descomposición, quedando el resto en forma residual para los años siguientes. Estimaciones de la mineralización del nitrógeno para el estiércol bovino en el primer año de aplicación es altamente variable y se encuentra en el rango de entre 0 y 50% del nitrógeno orgánico original. Una relación de descomposición de 0.35, 0.15, 0.10 y 0.05, indica que el primer año se descompone un 35%, el residual del primer año en un 15%, el residual del segundo un 10%, etc. (Van Kessel et al., 2000). Puede considerarse entonces para el Año 2, que es más gravitante el aumento de los nitratos que la baja en la humedad, en el incremento final de la CE (una menor humedad, por si sola, provocaría una disminución de la CE).

En relación al alto contenido de nitratos del Testigo durante el segundo año, siendo que esta parcela no recibió carga de estiércol alguna, es preciso remarcar que el mismo se ubicaba en un sector apartado del lugar de ensayo dentro del predio, rodeado de arbustos y cubierto periódicamente por plantas gramíneas, con lo cual la liberación de nutrientes en el testigo pudo haber respondido a un proceso propio de mineralización, dado por la materia orgánica natural en contacto directo con la parcela.

Respecto de la parcela 3, si bien es la única donde los nitratos disminuyeron, es la parcela que en su origen recibió la menor cantidad de estiércol de manera sensible (Tabla 1), lo que pudo haber contribuido a una menor disponibilidad de nitratos en los primeros centímetros de suelo al momento del muestreo en el segundo año.

Tanto los valores de CE_p (Conductividad Eléctrica en Pasta Saturada) determinados para los 40cm de profundidad y en la cabecera de cada parcela (a 1 m desde el origen), como los valores de CE de los modelos para la misma posición, se presentan en la tabla 3.

Las correlaciones surgidas de la tabla 3 (Fig. 8 y 9) muestran un buen ajuste para el Año 1, con un R² del 85%, y uno moderado para el Año 2 (R² del 55 %) instancia esta última donde el método geoelectrico pudo haberse visto condicionado, como se explicó anteriormente, por una mayor cantidad de datos ruidoso durante la convergencia de los modelos, en respuesta a las características más heterogéneas y contrastantes del suelo dentro de cada parcela.

	Año 1		Año 2	
	CEp (S/m)	CE (S/m)	CEp (S/m)	CE (S/m)
Testigo	0.02	0.01	0.01	0.05
Parcela 1	0.02	0.02	0.01	0.03
Parcela 2	0.03	0.06	0.02	0.05
Parcela 3	0.03	0.05	0.01	0.03
Parcela 4	0.03	0.04	0.02	0.09

Tabla 3. Para ambas instancia de medición (Año 1 y Año 2), valores de CEp (Conductividad Eléctrica en Pasta Saturada) determinados para los 40cm de profundidad y en la cabecera de cada parcela (a 1 m desde el origen), y los valores de CE de los modelos para la misma posición.

Table 3. For both measurement instances (Year 1 and Year 2), CEp values (Electrical Conductivity in Saturated Pasta) determined for the 40cm depth and at the head of each plot (1m from the origin), and the EC values of the models for the same position.

A diferencia de la CE, la CEp mide la conductividad eléctrica del suelo en respuesta sólo a la salinidad. Aun así, se esperó encontrar alguna correlación con la CE del método geoelectrico, que involucra a un conjunto de variables edáficas. En tal sentido, Sudduth et al. (2005) investigaron la relación de la CE con varias de estas propiedades, concluyendo para la relación CE-CEp, una correlación de aproximadamente el 60%, tanto para un suelo franco, como otro franco limoso en el estado de South Dakota, Estados Unidos, y para un contenido de humedad del 13%.

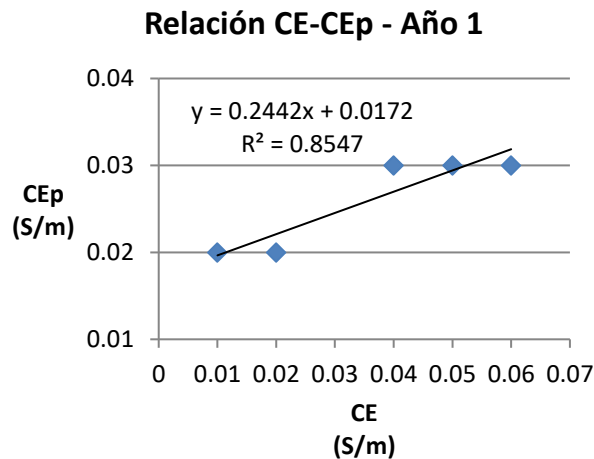


Figura 8. Año 1. Relación entre la CE (Conductividad Eléctrica del método geoelectrico) y la CEp (Conductividad Eléctrica en Pasta de Saturación) para la zona de la cabecera de las parcelas (a 1 m desde el origen) y a 40cm de profundidad.

Figure 8. Year 1. Relationship between EC (Electrical Conductivity of the geoelectrical method) and CEp (Electric Conductivity in Saturation Paste) for the area of the head of the plots (1 m from the origin) and 40 cm depth.

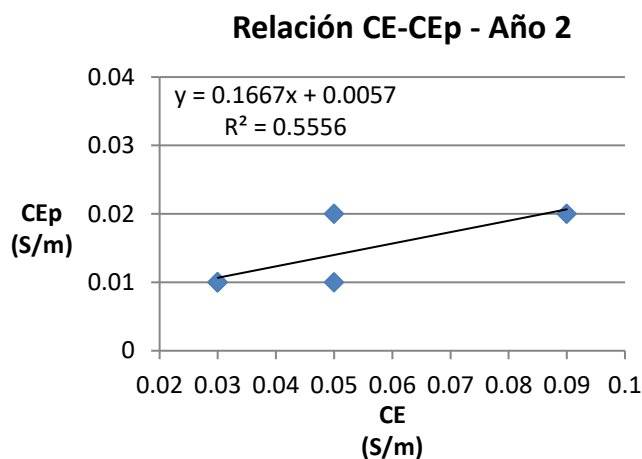


Figura 9. Año 2. Relación entre la CE (Conductividad Eléctrica del método geoelectrico) y la CEp (Conductividad Eléctrica en Pasta de Saturación) para la zona de la cabecera de las parcelas (a 1 m desde el origen) y a 40cm de profundidad.

Figure 9. Year 2. Relationship between EC (Electrical Conductivity) and CEp (Electric Conductivity in Saturation Paste) for the area of the head of the plots (1 m from the origin) and 40 cm depth.

CONCLUSIONES

El método de tomografía de resistividad eléctrica a pequeña escala resultó sensible a la mineralización de la materia orgánica producida por el estiércol bovino. La resolución de los perfiles laterales de resistividad eléctrica y su relación con el contenido de nitratos se ve favorecida bajo condiciones de humedad por encima del 20% y sin un excesivo agrietamiento del suelo. En tales condiciones, la eficacia de las tomografías eléctricas podría contribuir a un diagnóstico del aumento de sales de nitratos.

Los resultados alcanzados llevan a la necesidad de ampliar el estudio mediante el control de más numerosas y diferenciadas cargas de estiércol, aumentar la profundidad de muestreo, e incorporar al análisis otras sales que también tienen origen en la mineralización de la materia orgánica. Respecto de la relación CEp-CE se requiere incrementar la cantidad en el número de datos de CEp que permita una comparación más exhaustiva de la conductividad eléctrica del suelo entre ambas metodologías.

REFERENCIAS

- Allred, B.J., J.J. Daniels, M. Ehsani, (2008). Handbook of Agricultural Geophysics: CRC Press. London. UK: 410.
- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Petroleum Transactions of AIME, 146: 54–62.
- Bänninger, D., H. Wunderli, H. Fihler, (2009). Apparent electrical conductivity integrated from layered soil profiles. J. Plant Nutr. Soil Sci., 172:180–185.
- Corwin, D.L., S.M. Lesch, (2005). Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Computers and electronics in agriculture, 46: 103-133.
- Corwin, D.L., S.M. Lesch, S.R. Kaffka, J.W. Hopmans, Y. Mori, C. van Kessel, J.W. van Groenigen, (2003). Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. Geoderma, 114: 231-259.

- Corwin, D.L. (2008). Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurements using geophysical methods. In Handbook of Agricultural Geophysics: 21-22). Eds (Allred, B.J., Daniels, J.J., Reza Ehsani, M. CRC Press Taylor & Francis Group).
- Drommerhausen, D., D. Radcliffe, Brune, D., H. Gunter, (1995). Electromagnetic conductivity surveys of dairies for groundwater nitrate. *J. Environ. Qual.*, 24: 1083-1091.
- FAO (Organización para las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura), (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos (Estudio FAO: Riego y drenaje – 55) [en línea]. 1997. Capítulo 1 y 3 [consulta: mayo de 2016].
- Frohlich, R.K., C.D. Parke, (1989). The Electrical Resistivity of the Vadose Zone – Field Survey. *GroundWater*, 27: 524-530.
- Herrero, M.A., S.B. Gil, (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Asociación Argentina de Ecología. Ecol. Austral*, 18: 273-289.
- Johnson, C.K., K.M. Eskridge, D.L. Corwin, (2005). Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. *Comput Electron Agric*, 46: 181–202.
- Keller, G.V. (1988). Rock and mineral properties. *Electromagnetic Method in Applied Geophysics*. En: Nabighian, Ed., *Society of explorationgeophysicist*, 3: 1351pp.
- Kühn,J., A. Brenning, M. Wehrhan, S. Koszinski, M. Sommer, (2008). Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 10: 490-507.
- Losinno, B.N., C. Sainato, G. Galindo, C. Pomposiello, H. Malleville, D. de Abelleyra, (2003). Electrical Conductivity and depth of groundwater at the Pergamino zone (Buenos Aires Province, Argentina) through vertical electrical soundings and geostatistical analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 177-186.
- Losinno, B.N., CM. Sainato, H.J. Malleville, G. Galindo, (2008). Tomografía de Resistividad Eléctrica aplicada a la caracterización de sitios contaminados en tambos. *Ciencia del Suelo*, 26 (2): 141-152.
- Marbán, L., (2005). Métodos de extracción y determinación de nitratos en suelos. Parte 2. En: *Tecnologías en Análisis de Suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. (Editores: Marbán L, Rato S).
- Meteored. [en línea] (2016). [consulta: mayo de 2016]. http://www.meteored.com.ar/historico/tiempo-en_Buenos+Aires-America+Sur-Argentina-Ciudad+Autonoma+de+Buenos+Aires-SABE-1-13584.html
- Neely H.L., C.L.S. Morgan, C.T. Hallmark, K.J. McInnes, C.C. Molling, (2016). Apparent electrical conductivity response to spatially variable vertisol properties. *Geoderma*, 263: 168–175.
- Oldenburg, D.W., Y. Li, (1994). Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 59:1327–1341.
- Oldenburg, D.W., Y. Li, (1999). Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64(2):403–416.
- Page, A. L. (1982). Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties, 2ndedn (Part 2), in the series agronomy. American Society of Agronomy, Inc. SSSA, Inc., Madison, 1159 pp.
- Sainato, C., G. Galindo, H. Malleville, M. Herrero, (2006a). Diagnóstico de la contaminación en suelo y agua subterránea por actividad ganadera mediante sondeos geoelectricos en la microcuenca del arroyo Cañete (Pcia. de Bs. As.). *Revista de la Facultad de Agronomía. UBA*, 26(1): 73-82.
- Sainato, C.M., G. Galindo, O. Heredia, (2006b). Agua Subterránea: Exploración y utilización agropecuaria. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 115pp.
- Samouellian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Braund, A., Richard, G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science; a review. *Soil & Tillage Research*, 83: 173-193.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, W.J. Wiebold, (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Eletronics in Agriculture*, 43: 263-283.
- Tapias, J.C., M. Himi, A. Casas, (2005). Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica: Principios y Aplicaciones. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 7: 191-196.
- UBCGIF (University of British Columbia – Geophysical Inversion Facility). <https://gif.eos.ubc.ca/>

- Valente D.S., D.M. Queiroz, F. Carvalho Pinto, N. Terra Santos, F.L. Santos, (2012). The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. *Revista Ciência Agronômica*, 43: 683-690.
- Van Kessel, J.S., J.B. Reeves, J.J. Meisinger, (2000). *Journal of Environmental Quality*, 29 (5): 1669-1677.
- Weinzettel, P., M. Varni, S. Dietrich, E. Usunoff, (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ciencia del suelo*, 27 (1): 135-146.

Recibido: Mayo, 2016
Aceptado: Junio, 2017