

MODELADO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE PARA MEJORAR LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE SUELOS AGRÍCOLAS

Sebastian Javier Alonso^{1*}; Claudia Mabel Sainato¹, Mariano Santiago Iseas¹

¹ Catedra de física, Departamento de ingeniería agrícola y uso de la tierra, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Es de gran interés la utilización de sensores proximales de inducción electromagnética (EMI) en los estudios de las propiedades fisicoquímicas de suelos utilizados en la agricultura. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de un sensor de EMI en la determinación de la distribución horizontal y vertical de las propiedades del suelo. Se determinó el modo u operatoria de medición que permite relacionar la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo con las propiedades edáficas con mayor exactitud y establecer la distribución en profundidad de la conductividad eléctrica (CE) del suelo implementando el método de inversión 1D. Se efectuaron relevamientos de CEa a campo mediante EMI en tres sitios: dos a lo largo de transectas (sitios 1 y 2) y otro en un área de un lote bajo riego (sitio 3). Se analizaron correlaciones entre la CEa y algunas propiedades del suelo, y se confeccionaron mapas de CE con los modelos obtenidos a partir de las inversiones 1D en transectas. Se determinó que el mejor modo de orientación del instrumento es el horizontal. En el sitio 1 la CEa se correlacionó con el contenido de nitrato ($r = 0,67$) y con la CE del suelo medida en laboratorio (CEs) ($r = 0,69$). Por otro lado, en el sitio 2, la CEa se correlacionó con la humedad volumétrica ($r = 0,91$). En el sitio 3, se observó una alta correlación entre la CEa y pH ($r = 0,88$), CEs ($r = 0,87$), porcentaje de sodio intercambiable ($r = 0,91$) y contenido de sodio ($r = 0,91$). La variabilidad de la CEa explicó el contenido de sales y el grado de sodicidad del suelo. El modelado de la CEa permitió identificar las zonas o ambientes con distintos rangos en las propiedades del suelo relacionadas con la salinización y la sodificación como consecuencia de la aplicación del riego complementario.

Palabras claves: sensores proximales, salinización, riego complementario, agricultura de precisión.

MODELING OF APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY TO IMPROVE THE ASSESSMENT OF AGRICULTURAL SOIL PROPERTIES

ABSTRACT

The use of nearby electromagnetic induction (EMI) sensors is of great interest in the studies of the physicochemical properties of soils used in agriculture. The objective of this work was to evaluate the efficiency of an EMI sensor in determining the horizontal and vertical distribution of soil properties. It was determined the measurement mode or operation that allows relating the apparent electrical conductivity (ECa) of the soil with the edaphic properties with greater accuracy and the depth distribution of the electrical conductivity (EC) of the soil was determined by implementing the 1D inversion method. The ECa surveys were conducted in the field by EMI at three sites: two along transects (sites 1 and 2) and another in an area of a plot under irrigation (site 3). Correlations between ECa and some soil properties were analyzed, and EC maps were made with the models obtained from 1D inversions in transects. The best orientation mode for the instrument was determined to be horizontal. At site 1, ECa was correlated with nitrate content ($r = 0.67$) and with laboratory-measured soil EC (ECs) ($r = 0.69$). On the other hand, at site 2, ECa was correlated with volumetric humidity ($r = 0.91$). At site 3, a high correlation was observed between ECa and pH ($r = 0.88$), ECs ($r = 0.87$), percentage of exchangeable sodium ($r = 0.91$) and sodium content ($r = 0.91$). The variability of the

* Autor de contacto:
salonso@agro.uba.ar

Recibido:
03-08-21

Recibido con revisiones:
21-02-22

Aceptado:
21-02-22

ECa explained the content of salts and the degree of sodicity of the soil. The ECa modeling allowed the identification of areas or environments with different ranges in soil properties related to salinization and sodification as a consequence of the application of complementary irrigation.

Keywords: proximal sensors, salinization, complementary irrigation, precision agriculture.

INTRODUCCIÓN

En los estudios de las propiedades fisicoquímicas de los suelos destinados a la agricultura, uno de los factores limitantes es la variabilidad espacial y temporal de las propiedades edáficas a escala de lote o establecimiento, por lo cual, para lograr representatividad espacial es necesaria una gran cantidad de muestras (Doolittle y Brevik, 2014). Una alternativa para reducir el número de muestras es la adopción de herramientas y tecnologías de agricultura de precisión, tales como los instrumentos geofísicos de exploración de los primeros metros de profundidad o también llamados sensores proximales, en el marco de una disciplina denominada en inglés "Near surface geophysics". Específicamente, los sensores de inducción electromagnética (EMI) miden la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo que depende principalmente de la porosidad, la textura del suelo, el contenido de humedad y la conductividad eléctrica de la solución del suelo (Allred et al., 2008).

Las mediciones geospaciales de la CEa pueden proporcionar distribuciones espaciales de varias de estas propiedades edáficas (Doolittle y Brevik, 2014). En este sentido, Ji et al. (2019) señalan las ventajas del uso de sensores proximales en la predicción de la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo, pH y otras variables de interés agrícola. Valente et al. (2012) encontraron correlación entre la CEa y el contenido de fósforo extractable del suelo (Pe), mientras que con la materia orgánica la correlación fue muy baja y negativa. Peralta y Costa (2013) correlacionaron la CEa con contenido de sodio (Na^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), manganeso (Mn^{+2}), cobre (Cu^{+2}), calcio (Ca^{+2}), zinc (Zn^{+2}) y hierro (Fe^{+2}), y débilmente con potasio (K^{+}), Pe, nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) y azufre de sulfatos (S-SO_4^{-2}). Márquez Molina et al. (2014, 2015) encontraron buenas correlaciones de la CEa con la humedad ($r= 0,83$), la conductividad eléctrica medida en pasta de saturación ($r= 0,61$) y moderadas con el contenido de nitrato y Pe ($r= 0,5$) en corrales de engorde de ganado bovino, donde los contrastes de CEa son grandes por la presencia de acumulaciones de estiércol.

Asimismo, es de interés evaluar la distribución de las propiedades del suelo bajo riego complementario, actividad muy difundida en la Pampa Ondulada, de forma de minimizar los riesgos de salinización y/o sodificación del suelo. En ciertas condiciones ambientales y de manejo, esta práctica puede resultar en un deterioro del suelo causado por dichos procesos debido al agregado de iones disueltos en el agua de riego (Iseas et al., 2020; Sainato et al., 2020).

Si bien el mapeo de la CEa empleando herramientas geoestadísticas es ampliamente utilizado en la investigación agrícola, no aporta información precisa sobre el valor "verdadero" de la conductividad eléctrica (CE) del suelo, que responde al modelo de capas con distintas conductividades y espesores en función de la profundidad. La CE puede obtenerse a través de un modelado por inversión, que implica el proceso de ajustar los parámetros de un modelo teórico de CE del suelo hasta que los valores calculados o predichos de CEa coincidan con las mediciones de campo (Farquharson et al., 2003).

En la actualidad, son escasos los trabajos sobre la modelización de los datos de CEa obtenidos con los instrumentos EMI. Farzamian et al. (2018) a través de la inversión unidimensional (1D) de los datos de CEa obtuvieron el modelo de CE del suelo, con una distribución en profundidad coincidente con la conductividad eléctrica del suelo (CEs) medida en el extracto de pasta de saturación en laboratorio. Zhao et al. (2019) pudieron modelar con precisión la distribución en profundidad de una capa arcillosa mediante la inversión 1D de la CEa, para localizar reservorios de agua en una zona con aplicación de riego en Australia. Por lo tanto, resulta importante optimizar la metodología de medición de la CEa mediante los sensores proximales: establecer su eficiencia en detectar la distribución en profundidad de la CE del suelo y su relación con las propiedades edáficas.

En este contexto, el presente trabajo propone evaluar la eficiencia de la modelización de la CE del suelo mediante inversión 1D de la CEa, en la determinación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Para ello, se propone establecer el modo u operatoria de medición con un equipo de inducción electromagnética (GSSI EMP-400) que permite relacionar mejor la CEa con las propiedades edáficas, establecer la distribución en profundidad de la CE del suelo y analizar las correlaciones entre la CEa medida con EMI y distintas propiedades edáficas. Se hipotetiza que el modelado de la CEa permitirá correlacionarla con las

propiedades edáficas que presenten un amplio rango de variabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio de estudio

El estudio se realizó en un establecimiento agrícola que se encuentra cercano a la ciudad de Suipacha, Provincia de Buenos Aires (34°51'55.80"S 59°39'29.32"O) ubicado en la denominada Pampa Ondulada de Argentina. El clima es templado, con un promedio anual de lluvias de 1050 mm (1990-1997) y con temperaturas de valor medio de 23,7° C en verano, de 9° C en invierno y media anual de 16,3° C (Tauber, 2009). En el establecimiento se realizan cultivos extensivos en labranza con siembra directa y bajo riego complementario con sistema de pivote central. Se siembra un cultivo anual en primavera-verano en secuencia maíz (*zea mays*) - soja (*glycine max*) o dos anuales con la secuencia soja - trigo (*triticum*) - maíz (trigo en invierno). Las láminas de riego aplicadas se realizan en verano cuando el lote se encuentra cultivado con maíz y en general no superan los 300 mm por campaña agrícola. La fertilización de base es con urea (250 kg/ha) y DAP (fosfato di amónico) (170 kg/ha). El agua de riego proviene de 3 pozos de captación con una profundidad promedio de 45 m y su explotación corresponde al acuífero Pampeano (sección Epipelche) (Auge et al., 2002). Las aguas subterráneas utilizadas en riego complementario son mayormente caracterizadas como bicarbonatadas sódicas (Torres Duggan et al., 2018). En la clasificación específica realizada por Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1999) para la región pampeana, nos indica que podrían clasificarse como "aguas seguras" para el riego en función de su salinidad, mientras que en el criterio de sodicidad, se clasifican como "aceptables".

Los suelos característicos del Partido pertenecen al gran grupo de los Argiudoles, serie Chacabuco (INTA, 1966). Estos suelos son de textura franco limosa en los horizontes superficiales y franco limo arcillosa o franco arcillosa en los horizontes subsuperficiales, bien provistos de materia orgánica, no alcalinos, no sódicos y bien drenados. De la carta de suelos, se pueden distinguir siete horizontes en el perfil (Ap1, Ap2, AB, Bt1, Bt2, BC, C).

En la Figura 1a se presenta la profundidad del perfil de suelo vs el contenido de arcilla y arena obtenido de datos de la carta de suelo del INTA (1966), que coinciden con la distribución obtenida en un pozo del establecimiento por Iseas et al. (2020) y en la Figura 1b un registro litoestratigráfico de la zona no saturada obtenido en el pozo 1 (Figura 2a) (Comunicación personal del dueño del establecimiento a partir de un estudio hidrogeológico de los pozos, 2011).

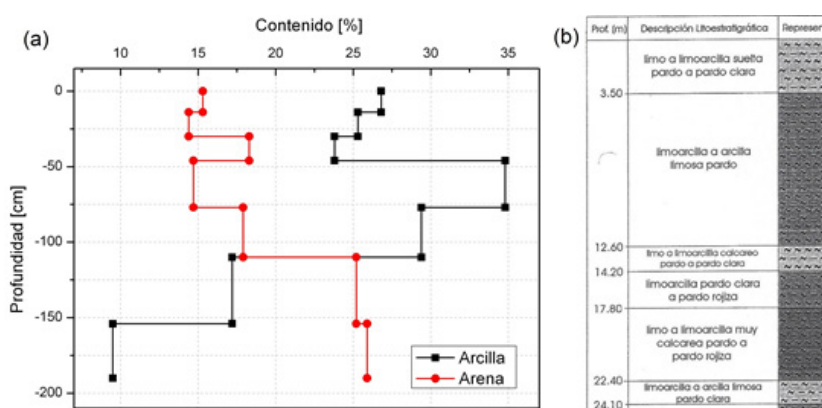


Figura 1. (a) Contenidos de arcilla y arena correspondiente a cada horizonte de suelo (INTA, 1966). (b) Descripción litoestratigráfica en profundidad obtenida del pozo 1 en el establecimiento (Comunicación personal del dueño del establecimiento a partir de un estudio hidrogeológico de los pozos, 2011).

Figure 1. (a) Clay and sand contents corresponding to each soil horizon (INTA, 1966). (b) In-depth lithostratigraphic description obtained from well 1 in the study (Personal communication from the owner of the establishment from a hydrogeological study of the wells, 2011).

Sondeos EMI

Dentro del establecimiento se realizaron tres relevamientos de CEa mediante EMI. Se realizó previamente un sondeo en forma de transecta en la banquina de un camino, cercano al cerco de un lote agrícola (sitio 1). En segundo lugar, se realizó un sondeo en un lote bajo riego complementario, para investigar la sensibilidad del sensor a la detección del contenido hídrico como consecuencia de la aplicación de la lámina de riego recientemente en dos tiempos diferentes. Se efectuó en forma de transecta, atravesando el área de riego y de secano (sitio 2). Por último, se trabajó en un lote agrícola para investigar el efecto del riego (realizado en las sucesivas campañas y con la última aplicación de la lámina con 5 meses de anterioridad) sobre las propiedades edáficas, mediante varias transectas y tratamientos geoestadísticos (sitio 3). Para ello se utilizó el conductivímetro Profiler EMP-400 (Geophysical Survey Systems, Inc., GSSI). Se trata de un sensor de EMI digital multifrecuencia portátil. El equipo de EMI incluye una fuente de corriente alterna con una bobina transmisora (primaria) y otra receptora (secundaria) y el sistema de adquisición y análisis de las ondas primarias y secundarias. Por la bobina transmisora circula la corriente alterna, que proporciona la fuente, generando un campo electromagnético primario que será el que inducirá las corrientes en los estratos del suelo. Este campo inducido secundario se mide en la bobina receptora. El espaciado entre bobinas es de 1,219 m. El ancho de banda del sistema se extiende desde 1 kHz a 16 kHz, en pasos de 1 kHz (a menor frecuencia la profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas es mayor). El conductivímetro mide las componentes en fase (IP) y en cuadratura (Q) de la relación de acoplamiento mutuo del campo transmitido y el campo inducido en partes por millón y también determina la CEa en mS m^{-1} (Allred et al., 2008).

La dirección de los dipolos magnéticos determina el modo de medición utilizado. Si las bobinas están en posición horizontal, sus dipolos magnéticos apuntarán en la dirección vertical, por lo que este modo se denomina modo dipolo vertical (MDV). Si las bobinas están en posición vertical, los dipolos apuntarán horizontalmente, siendo este el modo dipolo horizontal (MDH). El primer objetivo del trabajo fue establecer la eficiencia de las distintas orientaciones de los dipolos ya que producen respuestas diferentes en el suelo a diferentes profundidades (Allred et al., 2008).

En el sitio (1) de estudio, en junio de 2018, se realizó una transecta de 58 puntos de medición espaciados cada 10 m, con un largo total de 570 m. Entre la transecta realizada y el cerco perimetral del lote existía una canalización (suelo topográficamente más bajo) (Figura 2a). Para esta transecta se midieron, en ambas orientaciones del dipolo, las componentes IP y Q y la CEa en forma discreta sobre cada uno de los puntos de la transecta utilizando frecuencias de 16 kHz, 15 kHz, 14 kHz, 12 kHz, 10 kHz, 8 kHz, 6 kHz, 4 kHz y 2 kHz.

En el sitio (2), en diciembre del 2018 se midieron las componentes IP y Q y la CEa en otra transecta de 51 puntos espaciados cada 4 m, con un largo total de 200 m. Se trazó de tal manera que parte del recorrido estuviera en una zona regada unas horas antes, otra zona en donde el riego había sido aplicado 24 h antes, y otra en secano (Figura 2b). Se midió utilizando frecuencias de 16 kHz, 15 kHz y 14 kHz solo con el MDH en forma discreta sobre cada uno de los puntos de la transecta.

Por último, en un sitio (3) ubicado en el mismo lote implantado con maíz bajo riego, se relevó mediante sondeos EMI un área rectangular de 70 m de ancho por 150 m de largo, mediante 15 transectas de 150 m cada una, separadas 5 m entre ellas (Figura 2c). Esta área incluyó una zona de secano y una bajo riego. Cada transecta fue de 31 puntos de medición y fueron realizadas en julio del 2019. Se utilizaron frecuencias de 16 kHz, 14 kHz y 10 kHz solo en el MDH en forma discreta sobre cada uno de los puntos de las transectas.

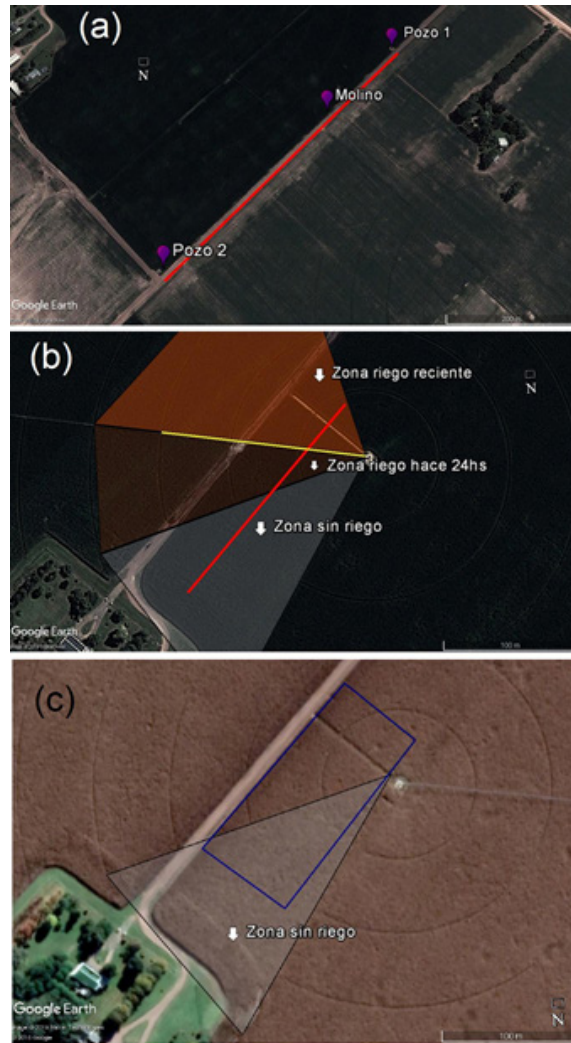


Figura 2. (a) Sitio 1 con la transecta (línea roja) de mediciones de la conductividad eléctrica aparente mediante EMI a lo largo de un camino interno sobre el suelo adyacente al lote agrícola (derecha). (b) Sitio 2 con la transecta (línea roja) donde se realizaron los sondeos EMI en la parcela bajo riego complementario. (c) Sitio 3 con el área rectangular (líneas azules) donde se realizaron los sondeos en la parcela con maíz.

Figure 2. (a) Site 1 with transect (red line) of apparent electrical conductivity measurements by EMI along an internal road above the soil adjacent to the agricultural plot (right). (b) Site 2 with transect (red line) where the EMI surveys were carried out in the plot under supplementary irrigation. (c) Site 3 with the rectangular area (blue lines) where the surveys were carried out in the corn plot.

En los sitios 1 y 2, los datos experimentales fueron invertidos utilizando el código de inversión 1D EM1DFM, desarrollado por el Grupo de Inversión Geofísica de la Universidad de Columbia Británica (UBC-GIF, 2021), basado en el trabajo de Farquharson et al. (2003). El método está basado en un modelo de capas 1D donde la cantidad de capas y el espesor de estas las determina el usuario y permanecen fijas durante el modelado. Para invertir se utilizan los datos experimentales de las componentes IP y/o Q y se calculan de forma iterativa los valores de CE del modelo teórico hasta alcanzar un ajuste por cuadrados mínimos con cierto nivel de error entre los valores de las componentes predichas por el modelo y las observadas experimentalmente. Como resultado se obtiene un modelo de CE para cada capa en función de la profundidad y la posición en la que se realizó la medición. El objetivo de la inversión es construir el modelo más simple que se ajuste adecuadamente a las observaciones de CEa minimizando una función objetiva (Farquharson et al., 2003).

La profundidad de investigación (PDI) es la máxima profundidad a la que un sensor EMI puede detectar un objetivo determinado (en nuestro caso distintos horizontes en el suelo) y se calcula según ecuaciones empíricas desarrolladas por Huang (2005). El cálculo establece la PDI en términos de la frecuencia del instrumento, la separación entre bobinas, la CE del suelo en este caso y un umbral de detección, que está relacionado con la precisión de los datos observados.

Para el sitio 3, los datos experimentales fueron invertidos para cada transecta por separado y las CE obtenidas a diferentes profundidades se interpolaron en el área para generar mapas en planta de CE (para 20, 60, 150 y 300 cm de profundidad) para poder compararlos con los mapas de las propiedades del suelo analizadas.

Análisis de las propiedades del suelo

Para la transecta en el sitio 1, se extrajeron muestras de suelo en los 58 puntos a una profundidad de entre 5 a 40 cm, descartando los primeros centímetros de suelo con vegetación. Se analizó en laboratorio la concentración de nitrato (NO_3^-) el cual fue extraído de muestras de suelo húmedas con una solución de CuSO_4 y determinado por el método de la colorimetría Snedd (Page et al., 1982). El contenido de fósforo extractable se determinó mediante la técnica de Bray y Kurtz descrita en Page et al. (1982). Para medir la CE se utilizó la técnica de dilución 1:2,5, mientras que el pH se obtuvo midiendo con un pHmetro en la solución obtenida de la dilución y la humedad gravimétrica (Hg) del suelo se obtuvo de forma convencional secando en estufa las muestras de suelo (Page et al., 1982).

En la transecta del sitio 2 se midió la atenuación de una onda electromagnética en cada uno de los puntos utilizando un sensor TDR (Time Domain Reflectometry). La humedad volumétrica (H_v) del suelo se determinó a través de una calibración entre las mediciones del instrumento y los valores de humedad gravimétrica y la densidad aparente medidas en muestras de suelo del sitio (Hillel, 2013).

Finalmente, en el sitio 3, en un diseño apareado se extrajeron muestras de suelo en 20 sitios de muestreo distribuidos espacialmente en grilla, de los cuales 10 sitios corresponden a riego y 10 a seco a una profundidad de entre 0 a 20 cm. Se analizaron en laboratorio la concentración de NO_3^- y Pe, con las mismas técnicas citadas anteriormente, la CE por la técnica de pasta saturada, pH con un pHmetro, CIC y Na^+ ambas por fotometría de llama (Page et al., 1982) y se calculó el PSI. Al igual que en el sitio 2, se estimó la H_v a partir del sensor TDR.

Análisis de correlación

En cada sitio por separado, se efectuó un análisis de correlación entre la CEa y las propiedades del suelo obtenidos en laboratorio a través de un ajuste lineal de las variables. Como resultado se obtuvo el coeficiente de correlación Pearson (r) y su nivel de significancia a través del valor p .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sitio 1

Para invertir se utilizaron solo los datos de la cuadratura Q para cada posición y frecuencia. Se determinó la PDI, utilizando la menor frecuencia (2 kHz) dado que para la mínima frecuencia con la que pueda medir el instrumento, será máxima la penetración del método y por ende es la profundidad hasta donde es válido el modelo. Se obtuvo 8,4 m en el caso del MDV y 4,2 m para el MDH. Se pueden ver los modelos de CE en función de la posición y la profundidad para la inversión con el MDH y MDV (Figuras 3a y 3b). La correlación entre los valores de Q observados (Q_{obs}) en cada punto y los predichos (Q_{pred}) por el modelo para ambos modos fue de $r = 0,99$ ($p < 0,001$). Se observa, para ambos modos, mayor CE en la superficie antes del metro de profundidad, que podría corresponder a los horizontes más arcillosos de suelo (Figura 1a). Por debajo del metro de profundidad, la CE disminuye como se esperaría para horizontes con mayor contenido de arena. Por otro lado, podemos observar que en el MDH se detecta un aumento de la CE hasta valores cercanos a 70 mS m^{-1} alrededor de los 3,5 m, que coincide con el comienzo de una capa con mayor contenido de arcilla (por lo tanto, de mayor CE con valores típicos cercanos a los del modelo) observada en las propiedades litoestratigráficas (Figura 1b).

Se analizaron correlaciones lineales entre la CEa medida para ambos modos en todas las frecuencias y las variables de interés agrícola. Pueden observarse (Tabla 1) los resultados para el MDH y MDV. En el caso del MDH, la correlación es moderada a alta para la CEa y NO_3^- , siendo la frecuencia con mayor correlación la de 15 kHz. Mientras que para el MDV las correlaciones son, en todos los casos, bajas. Alonso (2019) también observó, en otros casos, mayor precisión en el MDH para la determinación de propiedades de los distintos estratos del suelo en comparación con el MDV. Es decir que, en condiciones de baja humedad ($H_g < 30\%$) y sin cultivo, la CEa medida utilizando el MDH constituye una magnitud aceptable para la determinación de zonas con mayor salinidad del suelo y para la concentración de NO_3^- .

Tabla 1. Correlación (valor de r) entre la conductividad eléctrica aparente (CEa) y la humedad gravimétrica (Hg), pH, conductividad eléctrica (CEs), concentración de nitrato (NO₃⁻) y fósforo extractable (Pe) del suelo en la transecta del sitio 1 para el modo dipolo horizontal (MDH) y el modo dipolo vertical (MDV).

Table 1. Correlation (r value) between apparent electrical conductivity (CEa) and gravimetric moisture (Hg), pH, electrical conductivity (CEs), nitrate concentration (NO₃⁻) and extractable phosphorus (Pe) of the soil in transect at site 1 for the horizontal dipole mode (MDH) and the vertical dipole mode (MDV).

	MDH					MDV				
	Hg	pH	CEs	NO ₃ ⁻	Pe	Hg	pH	CEs	NO ₃ ⁻	Pe
CEa [16 kHz]	-0,09	-0,25	0,56*	0,55*	0,17	-0,22	0,17	0,16	0,14	0,15
CEa [15 kHz]	0,03	-0,38**	0,69*	0,67*	0,28	-0,26	0,25	0,10	0,08	0,09
CEa [14 kHz]	-0,07	-0,24	0,60*	0,59*	0,23	-0,18	0,16	0,16	0,13	0,17
CEa [12 kHz]	-0,05	-0,29**	0,66*	0,65*	0,23	-0,13	0,10	0,19	0,16	0,17
CEa [10 kHz]	-0,09	0,27	0,64*	0,63*	0,20	-0,18	0,15	0,14	0,12	0,14
CEa [8 kHz]	0,03	-0,37**	0,68*	0,67*	0,25	-0,17	0,16	0,15	0,13	0,17
CEa [6 kHz]	0,03	-0,37**	0,68*	0,66*	0,26	-0,17	0,14	0,16	0,14	0,15
CEa [4 kHz]	-0,06	-0,30**	0,67*	0,65*	0,20	-0,10	0,07	0,21	0,19	0,20
CEa [2 kHz]	0,03	-0,36**	0,66*	0,65*	0,26	0,04	-0,12	0,35**	0,33**	0,28

* p < 0,001; ** p < 0,05

De los valores de r obtenidos en las correlaciones entre las variables de interés agrícola, existe una alta correlación entre la CEa y NO₃⁻ (r = 0,99, p < 0,001), por lo que se podría estimar que la mayor contribución a la variabilidad de la CE de las soluciones del suelo viene dada por los iones de NO₃⁻. Wienhold y Doran (2008) encontraron en suelos de Nebraska franco limosos, luego de haberse cosechado soja el año anterior, que el nitrógeno de nitratos (N-NO₃) (con un rango de valores amplio) correlacionó con CEa (r² = 0,86) pero en forma negativa. Los autores señalan una falta de correlación de la CEa con la CEs medida en laboratorio, que lo atribuyeron al pequeño rango de valores que tomaba esta última propiedad. En el caso de nuestro estudio en el sitio 1, la CEa correlacionó con la CEs y ésta a su vez con la concentración de NO₃⁻, con lo cual se puede pensar que es coherente la correlación entre CEa y NO₃⁻. La presencia de concentraciones significativas de NO₃⁻ en un suelo supuestamente prístino en principio, se podría deber a la escorrentía superficial y/o subsuperficial desde el lote adyacente fertilizado ya que, entre la transecta realizada en el sitio 1 y el cerco perimetral del lote, se hallaba una zona topográfica más baja, con cierta depresión localizada a lo largo de la franja contigua al cerco perimetral, y los nutrientes se podrían haber transportado hacia esta canalización a través del riego y/o las precipitaciones. El valor mínimo de la concentración de NO₃⁻ fue de 14,8 mg kg⁻¹ y el máximo 583,39 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 239,62 mg kg⁻¹ y desvío estándar de 165,94 mg kg⁻¹, valores muy altos, comparables con los encontrados por Márquez Molina et al. (2015) en suelos de corrales de feedlot. Si bien Peralta y Costa (2013) no encontraron correlación de CEa con NO₃⁻, los valores de NO₃⁻ encontrados en el sitio 1 y su alta variabilidad justifican la correlación de la CEa con dicho nutriente. Por otro lado, existe una moderada a alta correlación del pH con la Hg (r = -0,63, p < 0,001), pH con la CEs (r = -0,72, p < 0,001) y pH con NO₃⁻ (r = 0,70, p < 0,001). El resto de las correlaciones son bajas o nulas.

Sitio 2

Se graficó la Hv medida con el TDR y la CEa en función de la posición, para las tres frecuencias utilizada para determinar cualitativamente su comportamiento (Figura 3c). Se puede observar que, para las tres frecuencias, los valores son similares y la CEa es mayor en las zonas en donde hay mayor contenido de humedad.

Se determinó que la PDI (14 kHz) fue de 2,74 m. Se puede observar (Figura 3d) el modelo de CE resultado de la inversión, donde la zona sin riego presenta valores de CE entre 35 y 50 mS m⁻¹. El aumento de la CE en las zonas regadas respecto al sector sin riego llega hasta los 2,5 m de profundidad. Claramente la zona recién regada presenta una mayor CE en todo el perfil del suelo. A los 30 m a lo largo de la transecta se puede identificar un área con mayor CE que corresponde a un camino interno que estaba anegado. También se observa en la zona regada 24 h antes del sondeo, una menor conductividad, mientras que al final de la transecta, en la zona sin riego, la CE es la menor del modelo. El coeficiente de correlación entre la CEa y Hv medida con el TDR, para las tres frecuencias fue de r = 0,91 (p < 0,001). Se puede estimar que, en estas condiciones de gran contraste de humedad en el suelo, la CEa refleja adecuadamente el contenido de agua en profundidad, corroborado con el muestreo al menos hasta los 20 cm. Por el contrario, Farzamian et al. (2018), en suelos con gran contraste de salinidad, encontraron gran correlación (r² = 0,9) entre la CEa y la CEs, no así con la humedad del suelo. Asimismo, los patrones espaciales de variabilidad de los modelos obtenidos se asemejan a la distribución de salinidad en profundidad. Sin embargo, Márquez Molina et al.

(2014, 2015) también encontraron correlación entre CEa y la humedad volumétrica en suelos de corrales de feedlot con alto contenido de materia orgánica y salinidad.

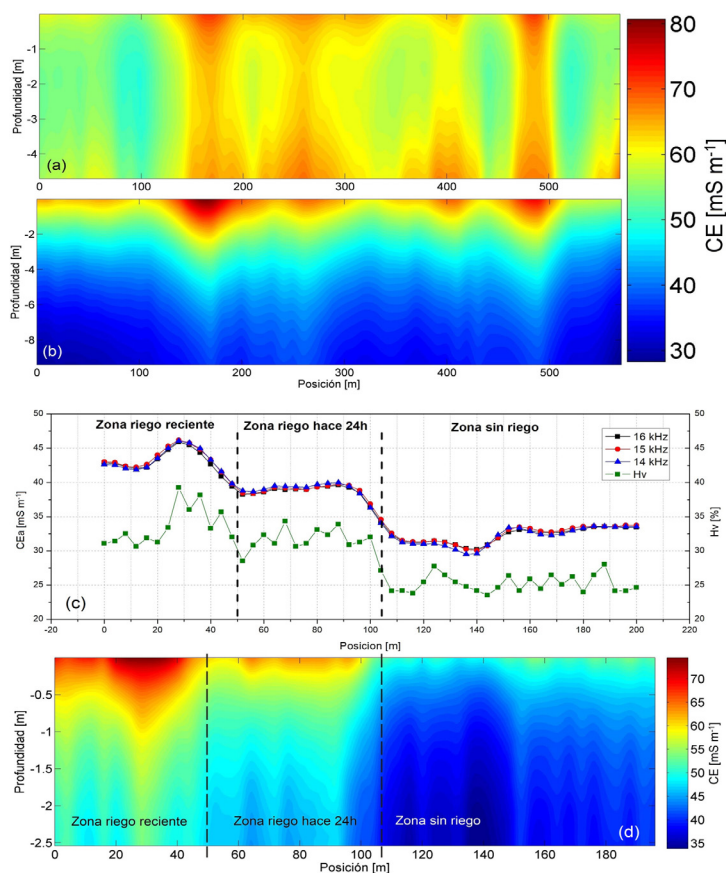


Figura 3. Modelo de conductividad eléctrica (CE) en función de la posición y la profundidad obtenido con la inversión de los datos en la transecta del sitio 1 (modo dipolo horizontal (a) y modo dipolo vertical (b)) y del sitio 2 (d). (c) Humedad volumétrica (Hv) (obtenida con TDR, 0-20 cm) y conductividad eléctrica aparente (CEa) en función de la posición para todas las frecuencias utilizadas en la transecta del sitio 2.

Figure 3. Electrical conductivity (CE) model as a function of position and depth obtained with inversion of the data in the transect at site 1 (horizontal dipole mode (a) and vertical dipole mode (b)) and at site 2 (d). (c) Volumetric moisture (Hv) (obtained with TDR, 0-20 cm) and apparent electrical conductivity (CEa) as a function of position for all frequencies for transect at site 2.

Sitio 3

Se determinó que la PDI (10 kHz) fue de 3,3 m. Con las inversiones de las 15 transectas, en las que se obtuvo la CE en función de la posición y la profundidad, se armaron mapas de CE bidimensionales, con interpolaciones cúbicas, a diferentes profundidades (Figura 4a). Puede observarse que la zona de riego resultó ser la de mayor CE para todas las profundidades y que a medida que aumenta la profundidad hay una disminución de la CE en toda el área, lo que reflejaría el efecto del riego por encima de los 300 cm. Los valores de correlación entre Q_{obs} y Q_{pred} fueron: $r=0,97$ (16 kHz), $r=0,98$ (14 kHz) y $r=0,99$ (10 kHz) con $p<0,001$ en todos los casos. Se muestran los mapas para algunas propiedades del suelo (Figura 4b). Se puede observar que, cualitativamente, las distribuciones espaciales del Na^+ , el PSI, la CIC, pH, CEs y TDR son similares y además con un patrón análogo al de la CE obtenida mediante la inversión para todas las transectas visualizado en los mapas de la Figura 4a. Estos resultados coinciden con los de Farzadian et al. (2018), quienes encontraron también patrones similares de variabilidad entre la CE obtenida por inversión de datos de CEa y la CE obtenida en pasta de saturación en zonas agrícolas bajo riego y en secano en Portugal. También los resultados son coincidentes con los de Heilig et al. (2011) quienes encontraron alta correlación de los mapas de CEa con el contenido de sodio de los suelos, en suelos franco limosos del norte de Dakota (EEUU).

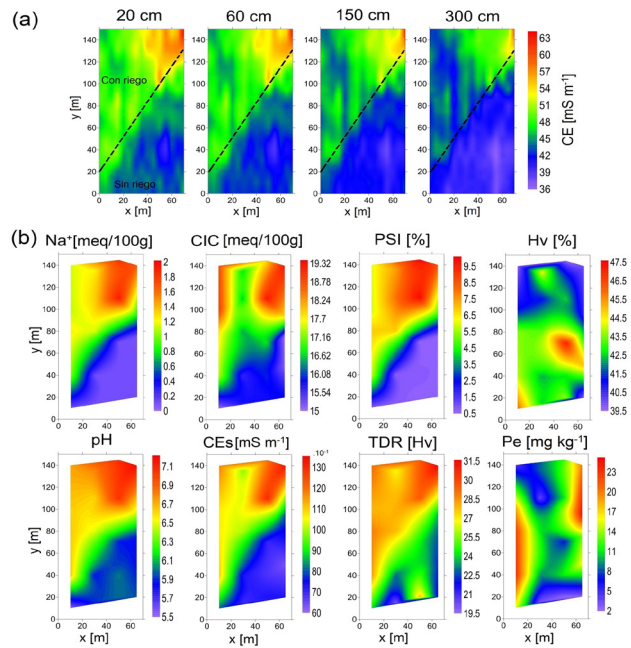


Figura 4. (a) Mapas de conductividad eléctrica (CE) para diferentes profundidades obtenidos con la inversión 1D de los datos experimentales en las 15 transectas en el sitio 3. (b) Mapas de las distintas propiedades fisicoquímicas del suelo (0-20 cm) en el sitio 3. Sodio (Na^+), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CEs), fósforo intercambiable (Pe), humedad volumétrica (Hv) y mediciones del sensor de humedad (TDR).

Figure 4. (a) Maps of electrical conductivity (CE) for different depths obtained with the 1D inversion of the experimental data in the 15 transects in site 3. (b) Maps of the different physicochemical properties of the soil (0-20 cm) in site 3. Sodium (Na^+), percent exchangeable sodium (PSI), cation exchange capacity (CIC), electrical conductivity (CEs), exchangeable phosphorus (Pe), volumetric humidity (Hv) and sensor measurements moisture (TDR).

Se observa que, en la zona de riego, la concentración de sodio y PSI es mayor debido posiblemente al carácter bicarbonatado sódico del agua subterránea utilizada en el riego. Iseas et al. (2020) encontraron en este establecimiento, en las parcelas bajo riego complementario, un evidente aumento de los indicadores de salinización y sodificación (CEs, pH y PSI) después de la campaña de riego respecto a los valores previos a la aplicación de la lámina de agua.

Se presentan los valores de ajuste r de la correlación lineal entre CEa y todas las variables de estudio (Tabla 2). Se observa que existe una alta correlación entre la CEa y el pH ($r = 0,88$), la CEs ($r = 0,87$), PSI ($r = 0,91$) y Na^+ ($r = 0,91$) y moderada a alta con CIC ($r = 0,71$) y TDR ($r = 0,71$). Por otro lado, Wienhold y Doran (2008) no encontraron correlación de CEa ni con pH ni con la CEs debido al bajo rango de variabilidad de dichas propiedades. Por el contrario, en el sitio 3, las altas correlaciones pueden deberse a que tanto el pH como la CEs tuvieron un amplio rango de valores debido a los contrastes entre los dos tratamientos (riego y secano).

Tabla 2. Correlación entre la conductividad eléctrica aparente (CEa), pH, conductividad eléctrica (CEs), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), contenido de nitrato (NO_3^-), fósforo intercambiable (Pe), sodio (Na^+), capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y las mediciones de humedad volumétrica (Hv) utilizando el sensor de humedad (TDR). Sitio 3.

Table 2. Correlation between apparent electrical conductivity (CEa), pH, electrical conductivity (CEs), percentage of exchangeable sodium (PSI), content of nitrate (NO_3^-), exchangeable phosphorus (Pe), sodium (Na^+), cation exchange capacity (CIC) of soil and volumetric moisture (Hv) measurements using the moisture sensor (TDR). Site 3.

	CEa [16 kHz]	pH	CEs	PSI	NO_3^-	Pe	Hv	TDR	Na^+	CIC
CEa [16 kHz]	1	0,88*	0,87*	0,91*	0,07	0,23	-0,30	0,71*	0,91*	0,70*
pH		1	0,92*	0,96*	0,003	0,27	-0,50**	0,84*	0,97*	0,87*
CEs			1	0,93*	0,26	0,28	-0,43	0,89*	0,94*	0,85*
PSI				1	0,11	0,27	-0,41	0,82*	0,99*	0,79*
NO_3^-					1	0,21	0,08	0,17	0,10	0,06
Pe						1	0,05	0,24	0,29	0,34
Hv							1	-0,26	-0,43	-0,49**
TDR								1	0,83*	0,75*
Na^+									1	0,83*
CIC										1

* $p < 0,001$; ** $p < 0,05$

La variabilidad de NO_3^- y Pe no se refleja en la de la CEa, en el suelo implantado con maíz, ya que los valores de concentraciones de NO_3^- en promedio no superan los 42 mg kg^{-1} (mucho menores que en el caso del sitio 1 y con un estrecho rango de valores) y no existen diferencias significativas entre los tratamientos de riego y secano (Iseas et al., 2020). Tampoco existen diferencias significativas entre riego y secano para el Pe y eso explica la baja correlación con la CEa, en contraposición con las correlaciones moderadas (r^2 cercano a 0,5) encontradas por Márquez Molina et al. (2014) y Valente et al. (2012). En nuestro caso, al estar el suelo en condiciones homogéneas de humedad (41,9 % y 43,2 % para riego y secano respectivamente, sin diferencias significativas según Iseas et al., 2020), se observa que, el contenido de sales y el grado de sodicidad del suelo del área bajo riego permitió explicar la variabilidad de la CEa con una alta correlación. Iseas et al. (2020) encontraron que, en el suelo bajo riego en este lote prácticamente se duplica su concentración de Na^+ respecto al secano. En términos generales, se cumple la hipótesis planteada y lo aseverado por Doolittle y Brevik (2014) donde el rango de variabilidad de la propiedad del suelo debe ser amplio para obtener una buena correlación con la CEa.

De tal forma, el modelado de la CEa permitió identificar ambientes que presentan diferencias en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Estas diferencias, especialmente las relacionadas con la salinización (CEs) y la sodificación del suelo (PSI), se deben al uso del riego complementario

CONCLUSIONES

Se concluye que las mediciones de CEa mediante inducción electromagnética con el sensor GSSI: a) resultaron más precisas, en el modo de medición de dipolo horizontal, para describir las características edáficas y establecer correlaciones con propiedades del suelo con rangos de variabilidad amplios; b) están altamente influenciadas por el contenido hídrico del suelo en condiciones de aplicación de riego reciente y c) permitieron identificar las zonas o ambientes con distintos rangos en las propiedades físicoquímicas del suelo evaluadas como consecuencia del uso del riego complementario. Además, la modelización de las mediciones EMI, constituiría una herramienta promisoriosa para la evaluación de la eficiencia en la distribución de las láminas de agua para riego. Por lo tanto, la elaboración de modelos de CE por inversión constituye un complemento importante en la información necesaria para el manejo del riego y de los nutrientes a aplicar en suelos de uso agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el proyecto UBACyT, código20020170100275BA, Programación 2018-2020. Los autores agradecen la colaboración de la Srta. Leticia Palazzesi en los análisis de suelos.

REFERENCIAS

- Allred, B. J., Daniels, J. J. y Ehsani, M. R. (2008). *Handbook of agricultural geophysics*. CRC Press, New York, USA, 410 pp.
- Alonso S. J. (2019). *Alternativas de medición de la conductividad eléctrica aparente para estimar la distribución espacial de propiedades de suelos agrícolas*. [Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Auge, M. P., Hernández, M. A. y Hernández, L. (2002). *Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la provincia de Buenos Aires, Argentina*. XXXII International Congress of International Association of Hydrogeologists and the VI Congress of Latin American Association of Groundwater Hydrology for Development 624-633.
- Doolittle, J. A. y Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223, 33-45.
- Farquharson, C.G., Oldenburgh, D. W. y Routh, P. S. (2003). Simultaneous 1D inversion of loop-loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity. *Geophysics*, 68(6), 1857-1869.
- Farzaman, M., Monteiro Santos, F. A., Catarina Paz, M., Gonçalves, M. C., Paz, A. M., Castanheira, N. y Triantafyllis, J. (2018). *Soil Salinity Assessment Using Electromagnetic Induction and Inversion Technique – A Case Study in Portugal*. Conference Proceedings, 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, pp 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-609.201802516>
- Heilig, J., Kempenich, J., Doolittle, J., Brevik, E. C. y Ulmer, M. (2011). Evaluation of Electromagnetic Induction to Characterize and Map Sodium-Affected Soils in the Northern Great Plains. *Soil Survey Horizons*, 52, 77-88.
- Hillel, D. (Eds). (2013). *Advances in irrigation* (vol 3). Elsevier, 336 pp.
- Huang, H. (2005). Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors. *Geophysics* 70(6), G135-G142.

- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1966). *Carta de suelos de la República Argentina: Serie Chacabuco (CHa)*, 10/437 C. <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Chacabuco.htm>.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1999). *Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG*. Seminario de capacitación. Impacto ambiental del riego complementario. Pergamino, Argentina. 87 pp.
- Iseas, M. S., Sainato, C. M. y Romay, C. (2020). *Efectos del riego complementario en propiedades físicas de un suelo Argiudol*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Ji, W., Adamchuk, V. I., Chen, S., MatSu, A. S., Ismail, A., Gan, Q., Shi, Z. y Biswas, A. (2019). Simultaneous measurement of multiple soil properties through proximal sensor data fusion: A case study. *Geoderma*, 341, 111-128.
- Márquez Molina, J. J., Sainato, C. M., Urricariet, A. S., Losinno, B. N. y Heredia, O. S. (2014). Bulk electrical conductivity as an indicator of spatial distribution of nitrogen and phosphorous at feedlots. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 156-172.
- Márquez Molina J. J., Urricariet, S., Sainato, C. M., Losinno, B. N. y Heredia, O. S. (2015). Effects of feedlot manure on soil and groundwater assessed with electrical resistivity tomography. *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1459-1472.
- Page, A. L., Miller, R. H. y Keeney, D. R. (1982). *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties, 2nd ed. American Society of Agronomy, Inc. SSSA, Inc.
- Peralta, N. R. y Costa, J. L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 218-226.
- Sainato, C. M., Iseas, M. S., Gómez, A., Romay, C. y Vázquez, A. (2020). *Relación entre la conductividad eléctrica aparente y las propiedades de un suelo bajo riego complementario*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Tauber, F. (2009). *Plan de Ordenamiento Urbano y Territorial: proyectos Viales y de Saneamiento y Estrategias de Desarrollo Local para el Partido de Suipacha. Estudio 1.EE.301*. Ministerio de Infraestructura, Vivienda y Servicios Públicos. Ministerio de Economía y Producción de la Nación Argentina.
- Torres Duggan, M., Rimski Korsakov, H., Álvarez, C. R. y Lamelas, J. A. (2018). *Relevamiento de la calidad de agua para riego complementario en la región pampeana*. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- University of British Columbia Geophysical Inversion Facility (2021). https://gif.eos.ubc.ca/software/main_programs
- Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, N.T. y Santos, F. L. (2012). The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. *Revista Ciência Agronômica*, 43(4), 683-690.
- Wienhold, B.J. y Doran, J. W. (2008). Apparent Electrical Conductivity for Delineating Spatial Variability in Soil Properties. En: B. J. Allred, J. J. Daniels y M. R. Ehsani. *Handbook of agricultural geophysics*. CRC Press, New York, USA.
- Zhao, X., Wang, J., Zhao, D., Li, N., Zare, E. y Triantafyllis, J. (2019). Digital regolith mapping of clay across the Ashley irrigation area using electromagnetic induction data and inversion modelling. *Geoderma*, 346, 18-29.