

2.23. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión

José Antonio Martínez Casasnovas^{1,3,*}, Jaume Arnó Satorra^{2,3} y Alexandre Escolà Agustí^{2,3}

* joseantonio.martinez@udl.cat

¹ *Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo*

² *Departamento de Ingeniería Agroforestal.*

³ *Universitat de Lleida, Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión, Agrotecnio-CERCA Center*

Índice

1.	Introducción	2
2.	¿Qué es y qué mide la conductividad eléctrica aparente del suelo?	4
3.	Sensores para la medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo	6
3.1.	Sensores de contacto galvánico (o de resistividad)	6
3.2.	Sensores de inducción electromagnética	8
4.	Aplicaciones en Agricultura de Precisión	10
4.1.	Aplicaciones en cultivos extensivos	10
4.1.1.	Conocimiento de las causas de la variabilidad y relación con el rendimiento del cultivo	10
4.1.2.	Muestreo dirigido de suelos y zonificación para el manejo diferenciado de las parcelas	12
4.2.	Aplicaciones en cultivos arbóreos	14
4.2.1.	Relación entre la CEa, las propiedades de los suelos y el vigor del cultivo	14
4.2.2.	Mapas de CEa para la sectorización óptima de los sistemas de riego	16
4.3.	Cartografía quasi 3D de la CEa	18
5.	Conclusiones	19

Resumen

Los suelos son un recurso natural fundamental en agricultura, ya que sustentan la vida de las plantas. El conocimiento de sus propiedades y cómo varían en el espacio es fundamental para mantener su productividad y para la toma de decisiones adecuadas sobre su manejo. No obstante, y dadas las características intrínsecas de los suelos de ser entes naturales que se desarrollan en profundidad, los hace difíciles de estudiar y de determinar su variabilidad en un grado de detalle adecuado para aplicaciones en Agricultura de Precisión. No obstante, desde la expansión de las tecnologías de la información geográfica (SIG, Teledetección, GNSS), y de

métodos de interpolación espacial, la percepción y la obtención de mapas del suelo o de propiedades de los suelos está cambiando. Así, dentro del ámbito de las técnicas y tecnologías de la Agricultura de Precisión, los sensores que miden la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) pueden ser una alternativa a tener en cuenta para poder inferir la variabilidad de las propiedades del suelo en cada punto de una parcela agrícola. Estos sensores se utilizan cada vez más para comprender y evaluar cómo varía espacialmente el suelo y también para definir zonas de manejo diferenciado en parcelas agrícolas, tanto en cultivos extensivos como en plantaciones frutícolas. En el presente artículo se explica qué es y qué mide la conductividad eléctrica aparente del suelo y con qué propiedades del suelo se puede correlacionar. También, los dos tipos de sensores que miden la CEa en continuo y que se utilizan en aplicaciones de Agricultura de Precisión: contacto galvánico directo e inducción electromagnética. Finalmente se exponen diversas aplicaciones de esta tecnología llevadas a cabo por el Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión de la Universitat de Lleida y Agrotecnio-CERCA Center en fruticultura, viñedo y cultivos extensivos.

1. Introducción

Los suelos constituyen un recurso natural fundamental, siendo la base de los ecosistemas terrestres y para la producción de alimentos, forrajes, fibras, masas forestales y energías renovables (Porta *et al.*, 2008). Son cuerpos naturales con una distribución espacial (geográfica) inherente, y el conocimiento de su variabilidad y manejo es fundamental para mantener su productividad y para poder comprender el complejo balance de los procesos físicos y químicos en los que intervienen (Scull *et al.*, 2003).

Tradicionalmente, el enfoque en cartografía de suelos ha sido estudiar su variación en el paisaje como resultado de la acción de los factores y procesos formadores. Este enfoque, que se conoce como de caja negra (Porta *et al.*, 2008), tiene su base conceptual en el modelo de formación de suelos de Jenny (1941) y, dada su simplicidad, ha contribuido de forma muy positiva a la cartografía de suelos. En la mayoría de los casos, el modelo se simplifica considerando la edafogénesis como función de uno o dos factores, pudiendo entonces establecerse funciones de variación de estos factores con los suelos. Éste es el modelo con el cual se han desarrollado la mayor parte de los mapas de suelos a escalas semidetalladas (1:50.000 a 1:250.000) y detalladas (1:25.000). Ahora bien, estos mapas tienen el problema de que, incluso en el caso de los mapas detallados, no muestran la distribución continua del ente natural que es el suelo o de sus propiedades, sino que los agrupan en unidades (cartográficas) como una colección de clases de suelos (clases taxonómicas). Un ejemplo es el que se muestra en la Figura 1, donde se ve como el vigor de los cultivos dentro de las delineaciones de las unidades del mapa de suelos puede presentar una gran variabilidad. De aquí se deduce que el mapa de unidades cartográficas puede no ser el tipo de mapa de suelos más adecuado para propósitos de Agricultura de Precisión.

2.23. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión

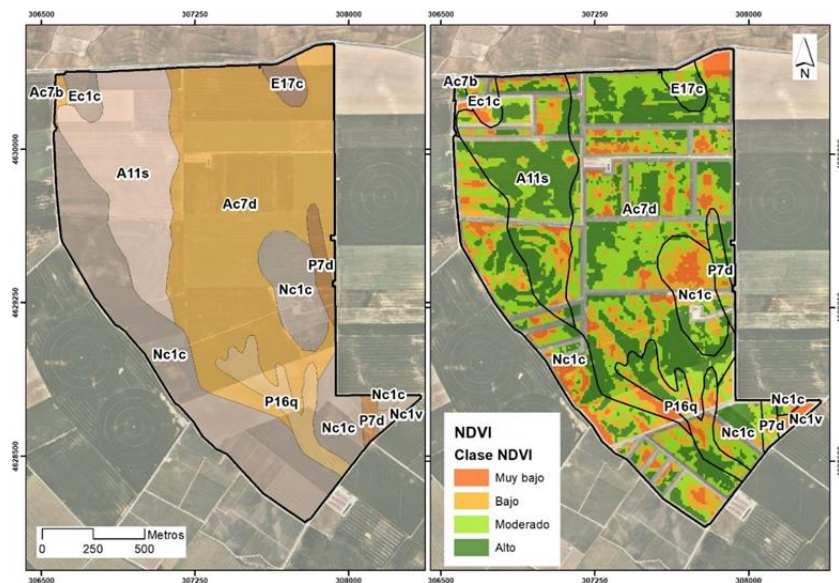


Figura 1. Izquierda: fragmento del Mapa de Suelos detallado a escala 1:25.000 de Cataluña que muestra la distribución de las unidades cartográficas de suelos, basadas en análisis fisiográfico y muestreo de campo para la definición de las unidades taxonómicas (clases de suelos). Sistema de coordenadas ETRS89 UTM31 Zona T. Derecha: clases del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) calculado a partir de imágenes Sentinel-2A. Fuente: adaptado de Martínez-Casasnovas et al. (2017).

No obstante, desde la expansión de las tecnologías de la información geográfica (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección, Sistemas Globales de Navegación por Satélite - GNSS) y de los métodos de interpolación espacial (geoestadística aplicada), la percepción y la obtención de mapas del suelo ha cambiado (Scull *et al.*, 2003). Esto ha provocado un cambio en la manera en que la información de suelos puede presentarse y analizarse espacialmente para satisfacer las demandas de uso de la información de suelos a escalas detalladas, así como en nuevas aplicaciones como la **Agricultura de Precisión**.

Debe tenerse en cuenta, también, que la variabilidad de las propiedades de los suelos no es solo en superficie, sino también en profundidad, lo cual hace que sea todavía más difícil conocer en detalle su variación. Además, esta variabilidad se puede hacer patente a diferentes escalas espaciales. Es decir, el suelo puede presentar propiedades diferentes dentro de una misma parcela, independientemente de su tamaño. Así, incluso en parcelas pequeñas (< 1 ha), muy frecuentes en pequeños huertos hortofrutícolas, puede haber una variación importante de las propiedades de los suelos (Figura 2).

Que el suelo sea variable y que esta variabilidad afecte a los cultivos y a su productividad es bien conocido, pero hasta principios de la primera década del 2000 esta variabilidad era difícil de caracterizar. Actualmente, los agricultores y técnicos tienen al alcance una diversidad de sensores para caracterizar algunas propiedades relevantes de los suelos. Probablemente, los más conocidos y utilizados son los sensores de humedad, que se emplean para la programación del riego. No obstante, dado que (en el mejor de los casos) los sensores que se instalan en una parcela son uno o dos, difícilmente puede conocerse la variación espacial del contenido de humedad de forma continua en toda la parcela. Así, el problema de estas medidas puntuales, como por ejemplo también lo son las tradicionales muestras de suelos, es la representatividad espacial de los puntos de muestreo. Es decir, ¿a qué superficie de la parcela representa una determinada sonda de humedad o una determinada muestra de suelos? ¿Cuál sería el número

de sensores adecuado o la cantidad de muestras a realizar? Esto es normalmente desconocido si no se ha hecho antes una cartografía muy detallada de los suelos. Pero, a su vez, hacer esta cartografía detallada es difícil y costoso, dado el carácter intrínseco de los suelos como cuerpos naturales que se desarrollan en profundidad y que, por tanto, no se ven.

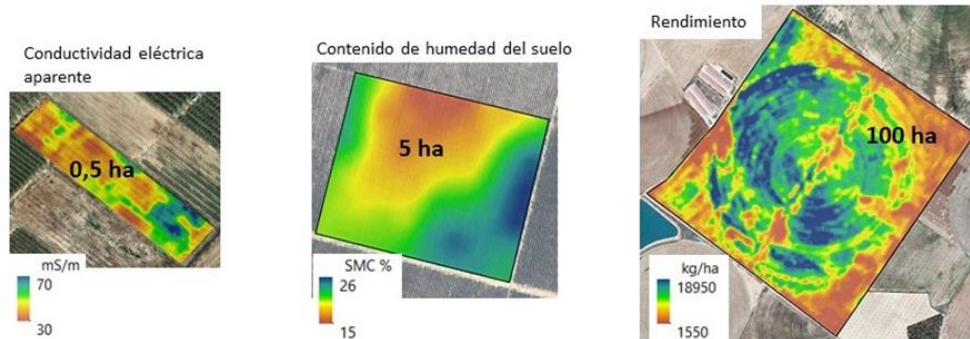


Figura 2. Comparación de la variación de propiedades de los suelos en diferentes tamaños de parcela. Izquierda: variación de la conductividad eléctrica aparente del suelo en una parcela de 0,5 ha. Centro: variación del contenido de humedad del suelo en una parcela de 5 ha. Derecha: variación del rendimiento en una parcela de 100 ha cultivada con maíz. Fuente: elaboración propia

Dentro del ámbito de las técnicas y tecnologías de la Agricultura de Precisión, los sensores que miden la **conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa)** pueden ser una alternativa a tener en cuenta para poder inferir la variabilidad de las propiedades del suelo en cada punto de una parcela agrícola. Estos sensores se utilizan cada vez más para comprender y evaluar cómo varía espacialmente el suelo (Corwin y Lesch, 2003), y también para definir zonas de manejo diferenciado en parcelas agrícolas, tanto en cultivos extensivos como en plantaciones frutícolas (Käthner y Zude-Sasse, 2015, Uribeetxebarria *et al.*, 2018a). Como la CEa varía en una escala espacial similar a la de muchas propiedades físico-químicas del suelo (Sudduth *et al.*, 2003), esta tecnología está siendo ampliamente aceptada y utilizada. Específicamente, se han documentado buenas correlaciones con la salinidad del suelo, el contenido de retención de humedad y la textura del suelo (Corwin y Lesch, 2005), o incluso con el contenido de C orgánico (Sudduth *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2009), la capacidad de intercambio catiónico (Sudduth *et al.*, 2005), el contenido de CaCO₃ (Kühn *et al.*, 2009; Uribeetxebarria *et al.*, 2018a), o la profundidad del suelo (Uribeetxebarria *et al.*, 2018a). Sin embargo, a pesar de estas buenas características predictivas, son escasos los estudios que refieren el uso de este tipo de sensores en horticultura y, más concretamente, en plantaciones frutales del área mediterránea.

En las siguientes secciones se ofrecen algunos conceptos sobre la medida de la CEa, así como de los tipos de sensores existentes y de la aplicación de esta tecnología en Agricultura de Precisión, tanto en cultivos extensivos como en cultivos arbóreos.

2. ¿Qué es y qué mide la conductividad eléctrica aparente del suelo?

La conductividad eléctrica (CE) es la medida de la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Su unidad de medida es S/m (siemens por metro), siendo el siemens la unidad del Sistema Internacional de Unidades para la medida de la conductancia eléctrica. En este caso, el material que actúa como conductor es el suelo y la CE mide la

capacidad de éste para conducir la corriente eléctrica gracias a la interacción de diferentes propiedades.

Las medidas estándar de la CE se realizan en extractos acuosos de muestras de suelo (p.e., en extracto de pasta saturada, o en extracto acuoso 1:5). Debido al tiempo, la mano de obra y el coste de obtener extractos de la solución del suelo, en las últimas décadas, se han desarrollado técnicas para la medida de la **CE del suelo “en bruto”**, lo que se conoce como **conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa)**. Así, la CEa mide la conductancia no solo a través de la solución del suelo, sino también a través de las partículas sólidas del suelo y mediante los cationes intercambiables que existen en la interfaz sólido-líquido de los minerales arcillosos (Corwin y Lesch, 2003). Por tanto, la conductancia eléctrica en suelos suficientemente húmedos se debe, principalmente, a las sales contenidas en la solución del suelo que ocupan los poros más grandes; en consecuencia, la medición de la CEa está estrechamente relacionada con la salinidad del suelo (Rhoades *et al.*, 1999). Sin embargo, también hay una contribución de la fase sólida, principalmente a través de los cationes intercambiables asociados a las arcillas (componente textural del suelo) y, además, a través de las partículas del suelo en contacto directo y continuo entre sí (Rhoades *et al.*, 1999).

Estas relaciones entre la CEa y las propiedades de los suelos, aunque variables según los casos, se han aprovechado hasta convertirse en un medio ampliamente aceptado de establecer la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo que influyen en su medición. No obstante, hay que saber que, dada la complejidad de las interacciones entre los diferentes componentes del suelo, no existe una correspondencia exacta entre la CEa y el contenido de salinidad, la textura u otras propiedades del suelo, sino que en cada caso se habrá de determinar mediante muestreos y análisis en laboratorio. A pesar de eso, autores como Lund *et al.* (1999) han llegado a establecer una correspondencia aproximada, como la que se muestra en la Figura 3. Las arcillas pesadas, con alto contacto entre partículas y alta capacidad de retención de humedad, son altamente conductoras. Las arenas gruesas, con contacto limitado entre partículas y baja capacidad de retención de humedad, son malos conductores. En suelos salinos, la respuesta de la CEa viene condicionada por la presencia de sales disueltas en el agua de los poros del suelo. Así, los valores de la CEa de las manchas salinas suelen ser mucho más altas que los obtenidos en arcillas pesadas.

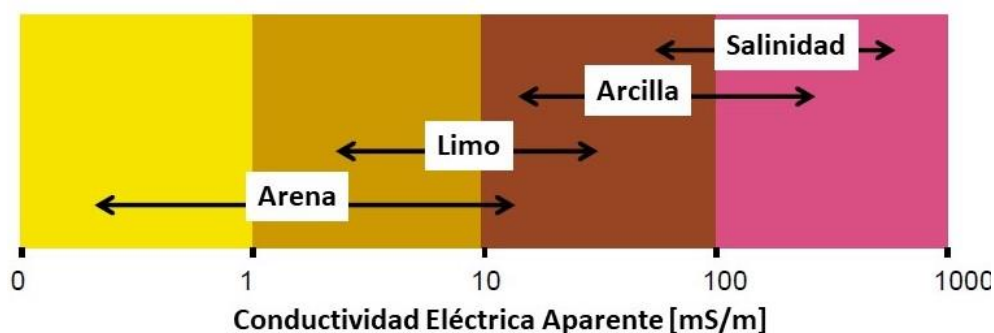


Figura 3. Correspondencia aproximada entre la conductividad eléctrica aparente del suelo y la abundancia en el suelo de las diferentes fracciones texturales y/o salinidad. Fuente: adaptado de Lund *et al.* (1999) y <https://www.veristech.com/the-sensors/v3100>.

No obstante, a pesar del enmascaramiento que puede producir el moderado o alto contenido en sales de un suelo en la inferencia de otras propiedades de interés, la medida de la CEa es una

de las herramientas más utilizadas en Agricultura de Precisión para la caracterización espacio-temporal de propiedades edáficas y antropogénicas que influyen en el rendimiento de los cultivos (Corwin y Lesch, 2005) o, por lo menos, para analizar su variabilidad a lo largo y ancho de las parcelas. Más información sobre la teoría y los principios básicos de medición de la CEa y lo que realmente mide, así como de las diferentes técnicas de medición, puede encontrarse en Corwin y Lesch (2003, 2005).

En la siguiente sección se presentan los diferentes tipos de sensores para la medida de la CEa y sus características.

3. Sensores para la medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo

Los sensores existentes para medir la CEa en continuo se diferencian según el método utilizado para introducir o inducir una corriente eléctrica en el suelo: **contacto galvánico directo**, o por **inducción electromagnética**. En ambos casos, y tal como se ha explicado anteriormente, el suelo mostrará una reacción determinada al paso de la electricidad dependiendo de sus propiedades. Como también se ha mencionado, la CEa se mide en siemens por metro (S/m), aunque en el caso de este tipo de medidores, y debido a la magnitud de la corriente inyectada y medida, la unidad más habitual son los milisiemens por metro (mS/m).

3.1. Sensores de contacto galvánico (o de resistividad)

Los sensores de resistividad eléctrica se basan en la introducción de una corriente eléctrica en el suelo a través de electrodos (transmisores) en contacto con la superficie del suelo (o a muy poca profundidad) y en la medición de la diferencia en el potencial de flujo de corriente en electrodos de potencial (receptores). Este método tiene su origen en la segunda década del siglo XX, siendo primeramente utilizado por Conrad Schlumberger en Francia y Frank Wenner en los Estados Unidos (Corwin y Lesch, 2005), si bien no fue hasta la década de los años 1990, después de la aparición de los sistemas satelitales de navegación global (GNSS) para uso civil, que se implementó a nivel comercial en la cartografía en continuo de la CEa.

Un ejemplo de este tipo de instrumentos es el desarrollado por Lund *et al.* (1999), denominado Veris 3100 Soil EC Mapping System (Veris Technologies, Inc., Salina, KS, EEUU). Ciertamente, el principio de funcionamiento es bastante simple y la configuración se conoce como “Wenner array” (Corwin y Lesch, 2005). La Figura 4 ilustra el principio de funcionamiento. La corriente eléctrica es inyectada en el suelo a través de un par de discos que penetran en el suelo unos 4-6 cm y que actúan como electrodos de corriente (electrodos de transmisión). Dependiendo de las propiedades físico-químicas del suelo, este será mejor o peor conductor de la electricidad, y el sensor captará una señal eléctrica de mayor o menor magnitud. Esto se hace mediante dos parejas adicionales de discos (electrodos de voltaje o receptores). Uno de estos pares de discos de voltaje se encuentra situado entre los discos de corriente, siendo la CEa asociada a estos discos la correspondiente a una profundidad de suelo entre 0-30 cm. Los otros dos discos de voltaje están situados en los extremos de la barra soporte o bastidor, por fuera de las ruedas de transporte. Esta mayor distancia entre discos permite cerrar un circuito eléctrico dentro de una profundidad aproximada de hasta 90 cm. Por tanto, mediante esta configuración dual, el sensor Veris 3100 proporciona dos medidas de CEa (superficial y profunda). Esta funcionalidad es

ventajosa, ya que permite inferir si las propiedades del suelo se mantienen uniformes con la profundidad o, por el contrario, el suelo presenta capas u horizontes con diferentes propiedades edáficas contrastantes. Debe tenerse en cuenta que en parcelas agrícolas el horizonte superficial es el más alterado durante las operaciones de laboreo.

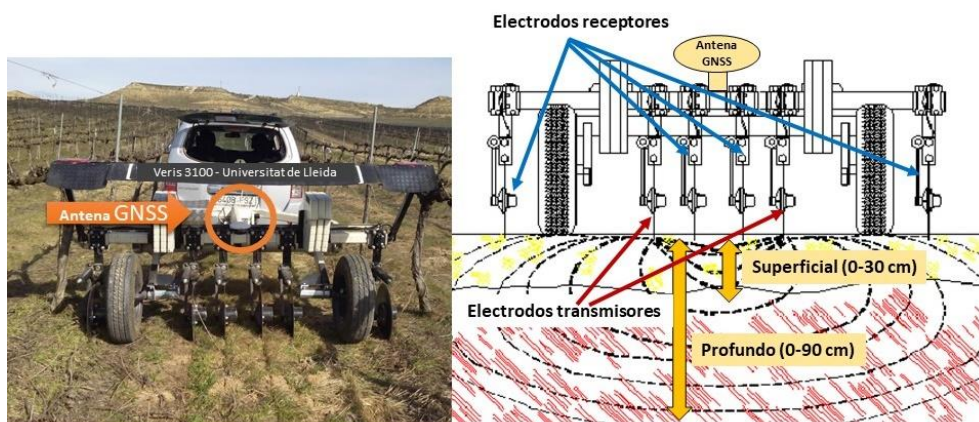


Figura 4. Izquierda: medidor de CEa de contacto galvánico Veris 3100 (Veris Technologies, Inc, Salina, KS, EEUU) de la Universitat de Lleida. Derecha: Ilustración del principio de funcionamiento del sensor Veris 3100. El sensor registra la conductividad eléctrica aparente de dos profundidades de suelo exploradas: superficial (0-30 cm) y profundo (0-90 cm). Muestra un punto cada segundo y lo georreferencia mediante un receptor GNSS que realiza una corrección diferencial a partir de la señal EGNOS, lo que garantiza una precisión submétrica de la localización de las lecturas. Fuente: foto José A. Martínez, gráfico adaptado de <https://www.veristech.com/the-sensors/v3100>

Tal como se indica en la Figura 4, el sistema incluye un receptor GNSS y un sistema electrónico de adquisición que registra la CEa de las dos profundidades de suelo exploradas a razón de un punto cada segundo. El sistema está diseñado para realizar medidas en continuo y solo registra datos si detecta movimiento del equipo. Así, la densidad de puntos adquiridos dependerá de la velocidad de desplazamiento del sensor (que puede ser de hasta 22 km) y de la distancia entre pasadas (entre 12 m y 15 m, en parcelas de cultivo extensivo; o a menor distancia si se pasa por las calles de plantaciones frutícolas), y. De esta forma, se pueden conseguir resoluciones de datos entre 200 y 1000 puntos/ha.

Un ejemplo de los datos que se adquieren con este tipo de sensor se muestra en la Figura 5. En este caso, se muestra una parcela de paraguayos (*Prunus persica* var. *platycarpa*), con un marco de plantación de 5 x 2,8 m, donde se consiguió una densidad muy alta (990 puntos/ha) al ser la distancia entre pasadas de solo 5 m, y adoptar una baja velocidad de desplazamiento.

Otro ejemplo de medidor de CEa que se basa en el mismo principio que el sensor Veris 3100 es el "Automatic Resistivity Profiler" (ARP) de la empresa Geocarta (París, Francia) (Dabas, 2008). En este caso, se trata de un sensor multipolo compuesto por cuatro pares de electrodos (discos) dispuestos en forma de V, los cuales están diseñados específicamente para optimizar la calidad de la señal adquirida. Como en Veris 3100, un par de electrodos se utiliza para inyectar corriente eléctrica en el suelo y los otros tres pares funcionan como electrodos receptores. Estos se disponen a una distancia de 0,5, 1 y 2 m de los discos de inyección, de forma que son capaces de medir la CEa hasta dichas profundidades, respectivamente.

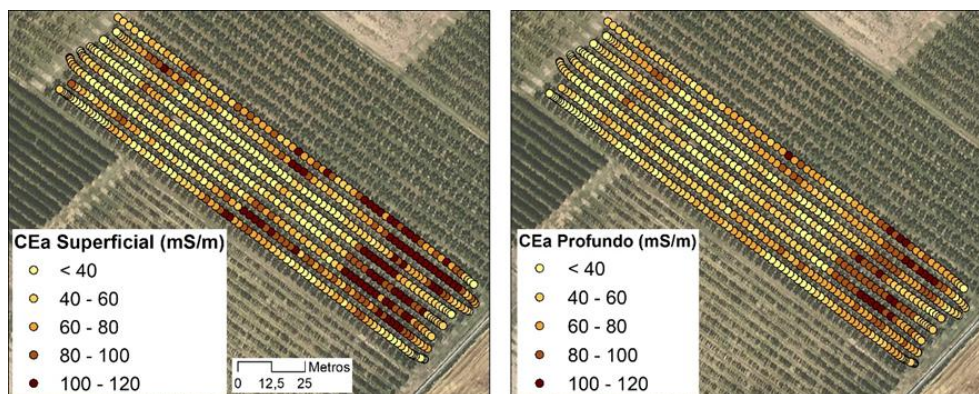


Figura 5. Ejemplo de puntos de muestreo adquiridos por el sensor Veris 3100 en una parcela de paraguayos (*Prunus persica* var. *platycarpa*) de 0,65 ha localizada en Gimenezs (Lleida). En total se adquirieron 644 puntos, lo que supone una densidad de 990 puntos/ha. Izquierda: valores de CEa medidos entre 0-30 cm (CEa superficial). Derecha: valores de CEa medidos entre 0-90 cm (Cea profunda). Fuente: elaboración propia a partir de datos adquiridos en el proyecto AgVANCE (AGL2013-48297-C2-2-R)

Como complemento a las medidas de CEa mediante contacto galvánico, la empresa Veris Technologies Inc. ha desarrollado, más recientemente, otros sistemas que, junto con la CEa, también son capaces de estimar el contenido de materia orgánica y el pH del suelo. Estos sensores se incorporan en los equipos MSP3 e iScan+. La materia orgánica se estima a través de un sensor óptico que se introduce en el suelo a través de una reja, y el pH se mide mediante un electrodo específico, si bien de este último se obtienen muchas menos lecturas por hectárea (de 10 a 25 muestras). Para más información se puede consultar la página web www.veristech.com.

3.2. Sensores de inducción electromagnética

Otro tipo de sensores para medir la CEa son los de inducción electromagnética (IEM). La aplicación de la IEM en la medida de la CEa apareció por primera vez a finales de la década de 1970 y principios de 1980, con el fin de medir la salinidad del suelo (Corwin y Lesch, 2005). Actualmente, los dos medidores de CEa de esta tipología más extendidos y utilizados son el EM38 (Geonics Ltd., Canadá) y el Dualem-2 (Dualem Inc., Milton, Canadá).

El principio del funcionamiento se muestra en la Figura 6. El sensor consta de una barra en la que hay tres bobinas, una en un extremo y las otras en el otro. Una de estas bobinas está alimentada por una corriente alterna y genera un campo magnético primario que se introduce en el suelo. El desplazamiento del sensor, sin necesidad de contacto físico con el suelo, induce una corriente eléctrica, ya que el suelo se comporta como un conductor. La mayor o menor capacidad del suelo para conducir la corriente eléctrica hace que las corrientes inducidas generen, en una segunda etapa, un campo magnético secundario de magnitud proporcional que, añadido al campo magnético primario, acaban atravesando el campo magnético que forman las otras bobinas situadas en el otro extremo de la barra. Estas bobinas tienen devanados diferentes, uno en sentido vertical y el otro en sentido horizontal, lo cual hace que puedan captar la señal a diferentes profundidades. Así, el voltaje medido en estas bobinas estará pues relacionado con la CEa del suelo correspondiente a distintas profundidades y, por lo tanto, a distintos volúmenes del mismo.

2.23. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión

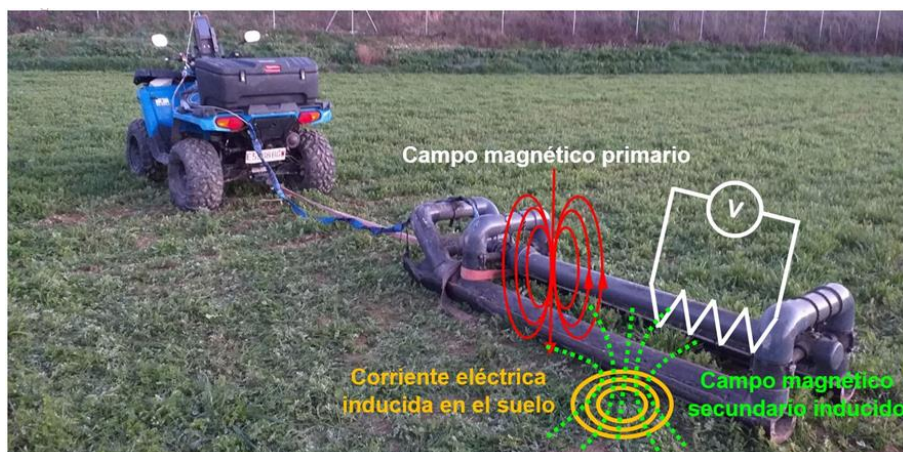


Figura 6. Ejemplo de medidor de la CEa mediante inducción electromagnética, en la que se muestra el principio de funcionamiento. En la foto el sensor Dualem-2 (Dualem Inc., Milton, Canadá) montado en un trineo de tubos de PVC y arrastrado por un quad (empresa Agrarium, Monzón, Huesca). Fuente: foto Jaume Arnó. Gráfico, elaboración propia

De los dos sensores IME mencionados, el EM38 quizá ha tenido una aplicación considerablemente mayor para fines agrícolas debido a que la profundidad de medición cubre aproximadamente toda la zona radicular (es decir, 1,5 m). En la configuración de la bobina con devanado horizontal, la profundidad de la medición es de 0,75-1,0 m, y en la configuración con devanado vertical, la medida llega hasta 1,5 m (Corwin y Lesch, 2005; Gebbers *et al.*, 2009). El Dualem-2 tiene una separación de 2 m entre el transmisor y los receptores, que también son una bobina con devanado horizontal y otra con devanado vertical. Con la configuración por defecto, las profundidades medidas de CEa son de hasta 1 m y 3,2 m, respectivamente. Sin embargo, en aplicaciones agrícolas suele únicamente interesar la CEa de la zona radicular y no hasta tanta profundidad. Esto se puede lograr de diferentes modos: (i) variando el espaciado de las bobinas, (ii) variando la frecuencia de operación, (iii) variando la geometría de la matriz de las bobinas o (iv) variando la altura de medición sobre el suelo (Gebbers *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2010). Un ejemplo de esta diferente configuración se muestra en la Figura 7, en la que el sistema se configuró para obtener la CEa de 0-30 cm y de 0-80 cm, variando la distancia entre bobinas y la altura de la barra en el patín.

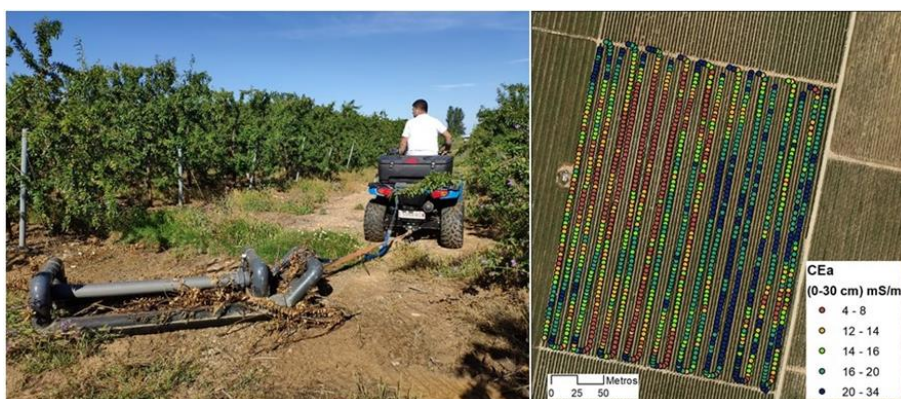


Figura 7. Cartografía de la CEa en una plantación súper intensiva de almendros de 6,5 ha localizada en Raimat (Lleida), mediante el sensor Dualem-2 (empresa Agrarium, Monzón, Huesca). La imagen de la derecha muestra los puntos de muestreo adquiridos coloreados según el valor de la CEa superficial. Fuente: izquierda, foto José A. Martínez; derecha, elaboración propia a partir de datos adquiridos en el proyecto PAgFRUIT (RTI2018-094222-B-I00)

A diferencia de los sensores de contacto galvánico, los sensores de IEM tienen la ventaja de que no es necesario garantizar un buen contacto entre el suelo y el sensor. Sin embargo, los sensores IEM requieren una calibración más compleja. Además, la presencia cercana de elementos metálicos (como, por ejemplo, los postes metálicos para el guiado de los árboles o cepas de una plantación), puede ocasionar interferencias en las medidas. En cuanto a la medida de la CEa, ambas tipologías de sensores presentan valores similares. No obstante, algunos autores como Gebbers *et al.* (2009), que han comparado los dos tipos de sensores, concluyen que los de contacto galvánico pueden ser más idóneos para aplicaciones en Agricultura de Precisión.

4. Aplicaciones en Agricultura de Precisión

Como se deduce de lo anteriormente expuesto, la CEa del suelo es una medida rápida y puede adquirirse en multitud de puntos dentro de una parcela con una alta resolución espacial. A partir de aquí, mediante interpolación, se pueden generar mapas continuos con la estimación del valor de la CEa en cada punto de la parcela. Esto puede servir para conocer cómo es el campo en cuanto a la variabilidad de las propiedades del suelo se refiere, obteniendo con esto una información complementaria a la proporcionada por los mapas de vigor o los de rendimiento. Y es que estos mapas (vigor y/o rendimiento) no proporcionan por sí solos toda la información necesaria para el conocimiento de las causas de la variabilidad de los cultivos ni para conocer las posibles actuaciones de mejora. En otros casos, los mapas de CEa pueden poner de manifiesto una variabilidad inducida por acciones antrópicas, que no son fácilmente detectables por otros medios. Por estas razones, la medida de la CEa se está extendiendo cada vez más como una de las aplicaciones de la Agricultura de Precisión, tanto para evaluar la calidad del suelo, como para conocer las causas de la variabilidad del desarrollo y rendimiento de los cultivos, como para delimitar zonas de manejo diferenciado, entre otras aplicaciones. Además, no hay que olvidar otras posibles causas de la variabilidad en el desarrollo de los cultivos como pueden ser las enfermedades, plagas, anomalías o fallos en los sistemas de riego o bien las acciones de manejo en sí.

A continuación, en las siguientes secciones se exponen diversos casos de aplicación, tanto en cultivos extensivos como en viña y frutales, en los que los autores han trabajado en diversos proyectos de investigación y estudios llevados a cabo por el Grupo de Investigación en AgróTICA y Agricultura de Precisión de la Universitat de Lleida / Agrotecnio-CERCA Center.

4.1. Aplicaciones en cultivos extensivos

4.1.1. Conocimiento de las causas de la variabilidad y relación con el rendimiento del cultivo

Muchas de las parcelas actuales provienen de las transformaciones de tierras y reparcelaciones que tuvieron lugar desde la segunda mitad del siglo XX con el fin de facilitar la mecanización de las labores agrícolas. Se han creado parcelas de mayores dimensiones en base a movimientos de tierras y nivelaciones, alterando las características iniciales e induciendo una mayor variabilidad en las propiedades de los suelos en las parcelas resultantes. Esto, a su vez, produce un comportamiento desigual en el desarrollo de los cultivos y sus rendimientos.

Tener conocimiento de las propiedades de los suelos y su variabilidad espacial es clave para mejorar los rendimientos y también la calidad de la producción, pero también para mejorar la

2.23. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión

eficiencia en el uso de insumos. Un ejemplo de la aplicación de la medida de la CEa en parcelas de cultivos extensivos es el que se muestra en la Figura 8. Esta figura muestra una parcela, de aproximadamente 100 ha, que fue creada a partir de la transformación de tierras realizada durante la década de 1980, pasando de numerosas parcelas más pequeñas, separadas por márgenes y bancales, a la actual de mayor extensión (Figura 8.1 y 8.2). El muestreo de la CEa con el sensor Veris 3100 mostró un rango de valores muy variable, de 6 a 211 mS/m, con un patrón de variabilidad espacial que muestra diferentes zonas con valores bajos, medios y altos (Figura 8.3). Además, también se muestra el mapa de cosecha (rendimiento) de maíz en la parcela (Figura 8.4).

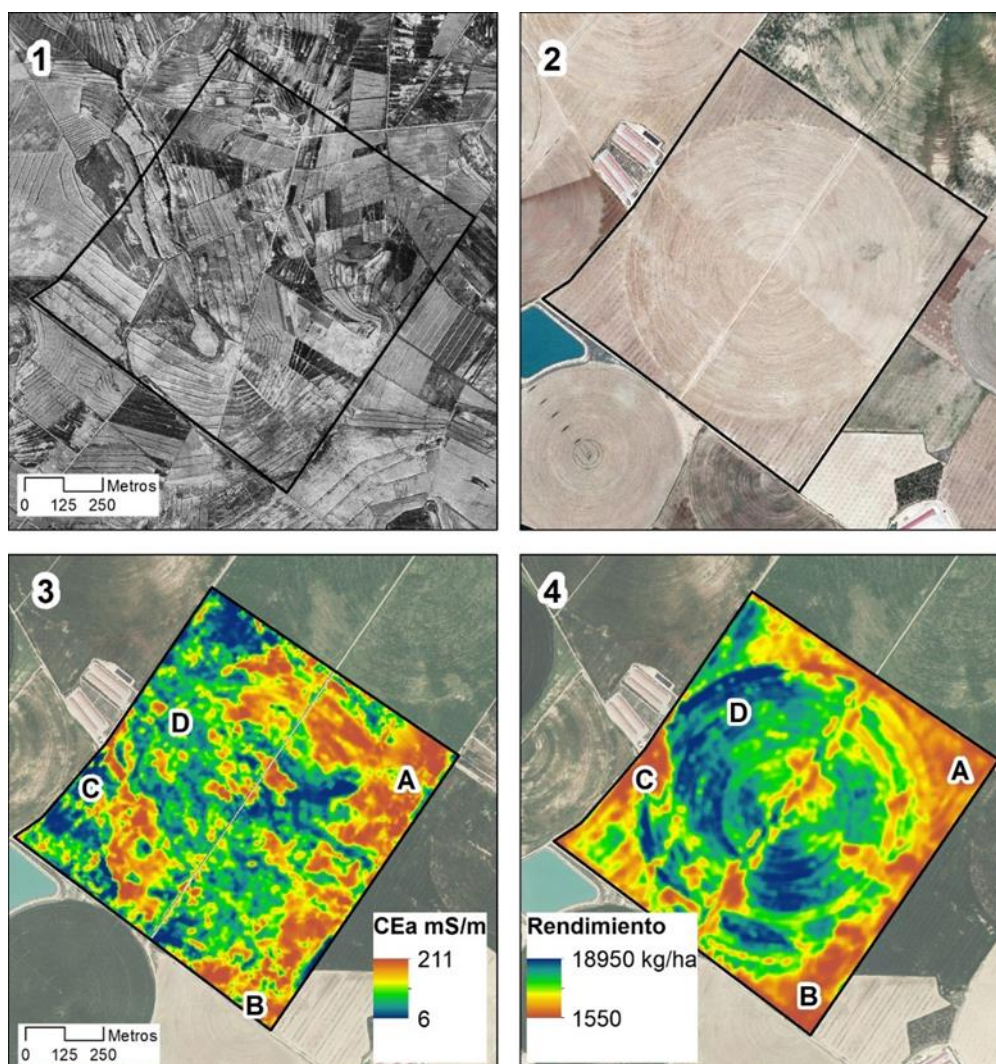


Figura 8. 1) Ortofotografía de la zona de estudio a finales de la década de 1940 (Vuelo Americano Serie A 1946-47), donde se observa la parcelación existente en la época. Se aprecia la disposición de las parcelas, que se adaptaban a la morfología del terreno. 2) Parcela resultante de la transformación de tierras llevada a cabo en la zona en la década de 1980. Se observa cómo, aparentemente, la parcela es bastante homogénea. 3) Mapa de la CEa profunda (0-90 cm) obtenido a partir de la interpolación de datos adquiridos con el sensor Veris 3100. Se observa una gran variabilidad en los valores en diferentes zonas de la parcela. 4) Mapa de rendimiento del maíz obtenido mediante interpolación a partir de los datos de un monitor de rendimiento FMX de Trimble instalado en una cosechadora Fendt 6335 CPL. Las diferentes zonas marcadas con letras se explican en el texto. Fuente: elaboración propia a partir de ortofotos en la página web del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (<https://pnoa.ign.es/>) y datos de estudios desarrollados por los autores.

La Figura 8 muestra la importancia de disponer de mapas de CEa para el conocimiento de las causas de la variabilidad de la cosecha. En primer lugar, si solamente dispusiéramos de la ortofoto de la Figura 8.2, se podría llegar a pensar que, después de la transformación de tierras realizada, la parcela es homogénea. No obstante, el mapa de cosecha de la Figura 8.4 demuestra que no es así, sino que hay una variabilidad considerable. Con el mapa de cosecha se pueden conocer las zonas donde hay un mayor o menor rendimiento, o un rendimiento medio, pero no las causas de la variabilidad. ¿Qué quiere decir esto? Que quizá no todas las zonas con un mismo color en el mapa (p.e., tonalidades naranjas en la Figura 8.4, que indica bajo rendimiento) tienen porqué tener el mismo problema o causa para ese bajo rendimiento. Si se compara el mapa de cosecha (Figura 8.4) con el mapa de la CEa (Figura 8.3), en las zonas indicadas con las letras A, B y C, se ve que hay un bajo rendimiento del cultivo, pero en la Figura 8.3 los valores de la CEa son muy diferentes (altos en la zona A y bajos en la zona C). Esto indica que las causas de la variabilidad son diferentes, y que el bajo rendimiento que se da en ambas zonas no tiene la misma causa.

En el caso del ejemplo de la Figura 8, mediante observaciones de campo y análisis de suelos en las zonas indicadas, se pudo determinar que los problemas en las zonas A y B son debidos a la salinidad, que causa la drástica disminución del rendimiento del maíz, así como el mal drenaje. Esto se pone de manifiesto en el mapa de CEa con los valores más elevados de la conductividad eléctrica aparente (mayores de 80-100 mS/m). Sin embargo, el bajo rendimiento en la zona C se debe a la textura arenosa y la baja profundidad del suelo por un contacto paralítico (roca arenisca). Esto se pone de manifiesto en los valores bajos de CEa en esta zona (menores de 20 mS/m), traduciéndose en una baja fertilidad del suelo y menor capacidad de retención de humedad, lo cual repercute también en el rendimiento del maíz. La zona D, con valores intermedios de CEa que se corresponden con suelos de texturas más equilibradas sin presencia de salinidad, es donde se dan los rendimientos más elevados.

Sin embargo, es cierto también que hay información que el mapa de CEa no aporta y sí en cambio el mapa de cosecha (como también podrían hacerlo los mapas de vigor obtenidos a partir de imágenes de satélite u otros medios a lo largo del ciclo del cultivo), y de ahí la importancia de combinar la información de diferentes fuentes. Por ejemplo, este es el caso del cambio brusco de rendimiento que se observa encima de la zona D y debajo de la zona C (Figura 8.4) y que no se observa en el mapa de CEa (Figura 8.3). En este caso, el origen de dicha discontinuidad en los valores del rendimiento no se debe a la variabilidad de las propiedades del suelo, sino al sistema de riego, que estaría indicando que en las coberturas de aspersores (esquinas de la parcela) se puede estar aplicando dosis inferiores a la que aporta el pívot central.

4.1.2. Muestreo dirigido de suelos y zonificación para el manejo diferenciado de las parcelas

Otro ejemplo de utilización de mapas de CEa es el que se muestra en la Figura 9. En ella, se muestra la situación anterior a una reparcelación llevada a cabo a final de la década de 1990 (Figura 9.1) y el resultado de la transformación de tierras llevada a cabo (Figura 9.2). En la situación previa, se observa como dentro del recinto de la parcela actual había una balsa de riego y también atravesaba un camino. Además, la zona estaba dividida en 4 parcelas o partes de ellas. El mapa de CEa generado a partir de datos del sensor Veris 3100 (Figura 9.3) puso de manifiesto la estructura lineal del camino enterrado, así como valores muy elevados de CEa en la zona de la antigua balsa, que fue rellenada con materiales de zonas adyacentes donde

afloraban lutitas con alto contenido en sales. A partir del mapa de CEa se dirigió un muestreo de suelos a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) con el fin de establecer la correspondencia entre la CEa y las propiedades de los suelos.

El muestreo llevado a cabo (Figura 9.3) puso de manifiesto que los suelos de la parcela son, en general, poco profundos. En la mayor parte de los puntos muestreados, el material originario (lutitas) aparecía entre 30 y 45 cm, constituyendo en muchos casos el horizonte cultivado. Este material lutítico es rico en sales y tiene una textura franco arcillo-limosa o franco limosa, con un contenido medio de arcilla del 25%. En particular, en la zona de CEa alta (Figura 9.4) se registraron niveles de sodio muy elevados, lo cual hacía recomendable eliminar el exceso de sodio en el complejo de cambio mediante una enmienda caliza, como por ejemplo con la aportación de yeso. También, en dicha zona se detectaron contenidos de nitratos muy elevados, dado que los cultivos no se desarrollan y no se consume el nitrógeno aportado, ni se elimina por el mal drenaje de estos suelos.

Esta información es de gran interés para la gestión diferenciada de la aportación de insumos en la parcela, ya que si no se mejoran las condiciones del suelo (y esto, en este caso particular, puede ser a largo plazo), hay zonas en la parcela con un potencial productivo muy bajo donde, por mucho fertilizante que se aporte, el cultivo no lo aprovechará. Así, el ajuste y/o redistribución de dosis en esta parcela puede suponer un incremento del beneficio al adaptarse la fertilización al potencial productivo de cada zona y evitar así el coste de oportunidad que supone un manejo uniforme así como las posibles consecuencias medioambientales.

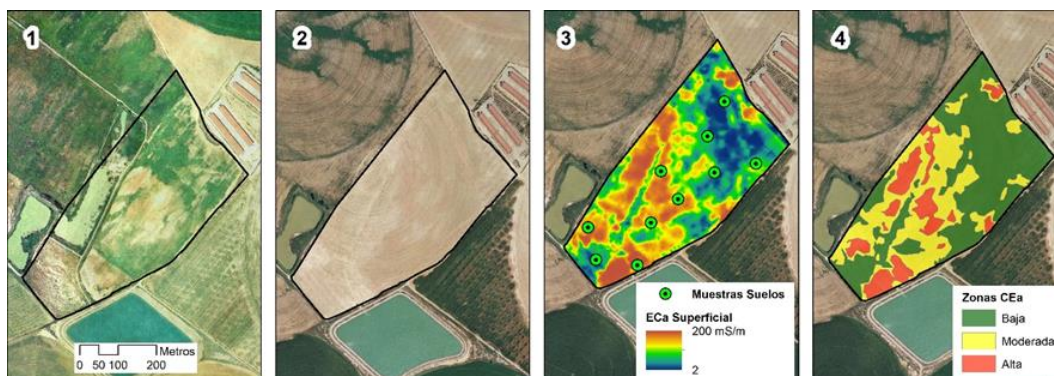


Figura 9. Ejemplo de mapa de CEa y su zonificación en tres zonas en base a la reclasificación de los valores, con el fin de establecer recomendaciones de manejo diferenciado en cultivos extensivos. 1) Parcelación en 1997. 2) Parcelación actual. 3) Mapa de la CEa superficial y puntos de muestreo para la caracterización de los suelos. 4) Mapa de zonas de manejo diferenciado. *Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEa adquiridos con el sensor Veris 3100 en estudios realizados por los autores y ortofotos históricas de IDEARAGON (Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón).*

En resumen, como se muestra en los ejemplos anteriores, la utilización de diversas fuentes de datos sobre la variabilidad de las propiedades de los suelos y el rendimiento o vigor de los cultivos, y su correcta interpretación, puede ser muy útil para identificar problemas. En particular, los mapas de CEa pueden ser muy útiles para conocer el potencial productivo de los suelos de la parcela y analizar las propiedades que limitan dicho potencial. Los problemas de salinidad y mal drenaje pueden solucionarse en muchos casos mediante la instalación de drenes y lavados. Los problemas de textura pueden ser más difíciles de solucionar, aunque la aplicación de enmiendas orgánicas y el riego adaptado con un suministro más frecuente de agua y

fertilizantes podría ser una posible solución. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la aplicación de técnicas de Agricultura de Precisión no implica siempre obtener beneficios a corto plazo.

4.2. Aplicaciones en cultivos arbóreos

4.2.1. Relación entre la CEa, las propiedades de los suelos y el vigor del cultivo

El cambio de la agricultura tradicional a una más mecanizada ha afectado también a las plantaciones frutícolas. Los efectos producidos sobre la variabilidad del suelo en estas plantaciones y sobre la variabilidad inducida no han sido suficientemente estudiados. Al igual que en los casos expuestos anteriormente, los sensores de CEa pueden servir para analizar el terreno y poner de manifiesto las transformaciones realizadas, así como la variabilidad inducida en las propiedades del suelo.

Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Uribeetxebarria *et al.* (2018b) en una plantación de nectarinos localizada en el término municipal de Aitona (Lleida). En este caso, la transformación de tierras realizada en la década de 1980 quedó patente en el mapa de la CEa obtenido mediante el sensor Veris 3100. La Figura 10 ilustra la situación anterior a la transformación y el posterior efecto sobre la variabilidad de la CEa.

Tal como muestra la Figura 10.1, antiguamente el cultivo tradicional eran árboles de secano (olivo o almendro) organizados en bancales para adaptarse mejor a la morfología del terreno. De esta manera, se evitaba la erosión y se favorecía el almacenamiento de agua, muy importante en condiciones de secano. Con la transformación realizada para la creación de plantaciones intensivas de frutales, se eliminaron los bancales, con consecuencias para la continuidad de las propiedades de los suelos. Esto queda claramente reflejado en las zonas A y B de la Figura 10.2, donde se muestra la discontinuidad que quedó en los suelos después de los movimientos de tierra para eliminar los bancales. En particular, en la zona B, la baja CEa es consecuencia de los elementos gruesos de rocas calcáreas con baja CEa y nula fertilidad físico-química que hicieron aflorar los movimientos de tierras. Los valores de CEa en la zona A se corresponden con una menor profundidad del suelo, lo que explica el menor desarrollo de los árboles (Figura 10.3). La zona C presenta valores mayores de CEa, que indican presencia de salinidad. Sin embargo, el vigor de los frutales tanto en la zona C como en la B es mejor, contrastando con las propiedades del suelo inferidas a partir de la CEa.

El estudio de Uribeetxebarria *et al.* (2018b) demostró que, en el caso de suelos con contenidos moderados o altos de sales, la correlación entre la CEa y la textura u otras propiedades de interés puede verse enmascarada, no observándose correlaciones significativas. Así, las únicas correlaciones obtenidas a partir de los análisis realizados en 40 puntos de muestreo fueron con la CE 1:5 (CE del extracto acuoso 1:5) y con la profundidad del suelo, pero no con propiedades como los componentes texturales, materia orgánica o capacidad de retención de humedad, por ejemplo. Tampoco se observó una correlación entre la CEa y el NDVI en los mismos puntos de muestreo, como se puede comprobar en la falta de correspondencia entre las Figuras 10.2 y 10.3. La razón de esta discrepancia la podemos encontrar en el riego localizado de los árboles que, por un lado, mantiene la salinidad fuera del bulbo húmedo explorado por las raíces y, por otro, proporciona los nutrientes necesarios vía fertirrigación. Esto afecta particularmente a las áreas donde se encontraban los antiguos bancales que fueron eliminados en la reparcelación,

que supuso una alteración de las propiedades de los suelos originales. No obstante, un análisis multivariante de la varianza (MANOVA) puso de manifiesto que, además de la salinidad y la profundidad del suelo, el contenido de arcilla también se mostró como propiedad relevante que contribuye a la CEa medida. Así mismo, el contenido de limo, arena y la capacidad de retención de humedad estaban más correlacionadas con el NDVI.

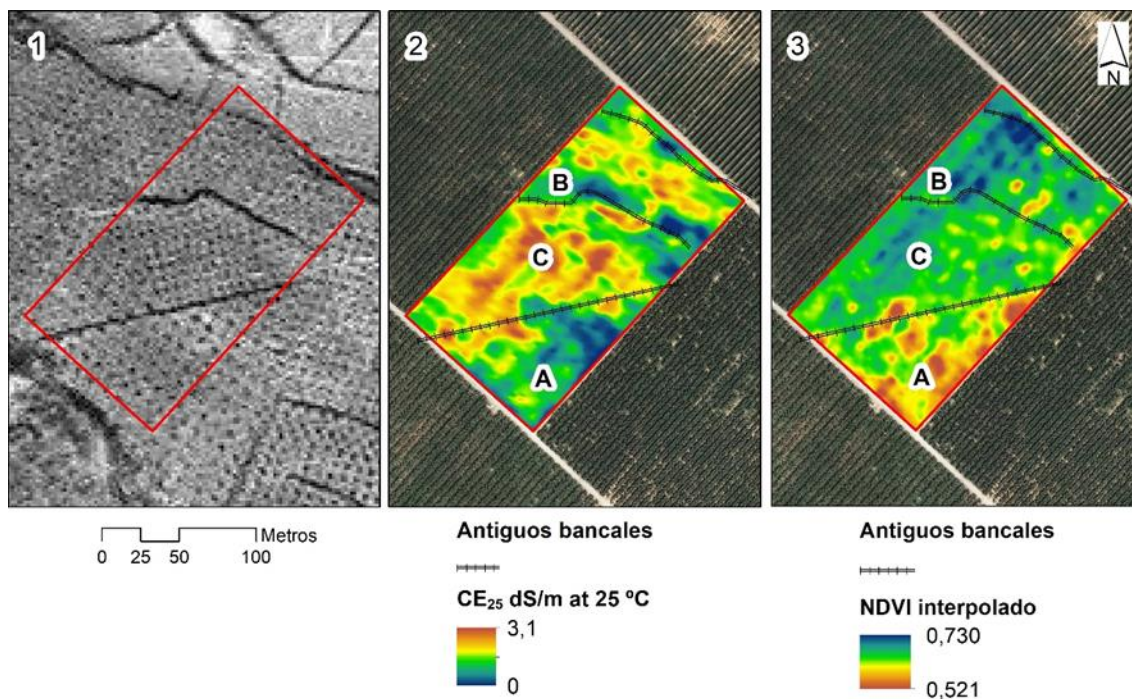


Figura 10. Comparación de la situación anterior a una transformación de tierras y cultivos en una zona del municipio de Aitona (Lleida). 1) Ortofotografía de la zona de estudio a finales de la década de 1940 (Vuelo Americano Serie A 1946-47) que muestra la situación anterior a la transformación de tierras donde se aprecia el cultivo de almendros y olivos en secano. 2) Mapa de la CEa (transformada a valores de CE en unidades de dS/m a 25°C) donde se aprecia la disposición de los antiguos bancales que fueron eliminados para la creación de nuevas parcelas más fácilmente mecanizables. 3) Mapa del NDVI interpolado a partir del NDVI promedio de cada árbol de la plantación de nectarinas obtenido de una imagen multiespectral de 0,25 m/píxel adquirida desde avioneta. Fuente: adaptado de Uribeetxebarria *et al.* (2018b), proyecto AgVANCE (AGL2013-48297-C2-2-R).

En el caso del ejemplo de Uribeetxebarria *et al.* (2018b), los resultados sugirieron varias estrategias de manejo variable de la plantación. Una estrategia estaría basada en establecer zonas de manejo en base a clases de CEa que servirían, principalmente, para incrementar las dosis de riego en los puntos con CEa más elevada y así favorecer el lavado de sales y ampliar los bulbos libres de sales. En la actualidad, esta recomendación no sería fácil de implementar, ya que el sistema de riego consta de un solo sector, pues fue diseñado para realizar riegos uniformes sin tener en cuenta la variabilidad espacial del suelo. No obstante, podría ser posible actuar aumentando el número de emisores por árbol en aquellas zonas de alta CEa. Una segunda estrategia sería delinear zonas de manejo según clases de NDVI, que servirían de referencia para regular el vigor de los árboles y su rendimiento a través de diferentes acciones de manejo como pueden ser la poda, la aplicación de reguladores del crecimiento o el aclareo de frutos.

4.2.2. Mapas de CEa para la sectorización óptima de los sistemas de riego

Como se ha visto en el ejemplo anterior, el diseño del riego antes de establecer una plantación, también aplicable a parcelas de cultivos extensivos, es fundamental para poder ajustar las dosis de riego según la variabilidad de las propiedades de los suelos. Así, la sectorización óptima debería basarse en el análisis previo de la variabilidad espacial de los suelos y su correcta interpretación, para lo cual los mapas de CEa son una buena herramienta para este propósito.

Por tanto, y como paso previo a la instalación de un riego, sería de suma importancia disponer previamente de la información sobre la variabilidad de los suelos para que, antes de diseñar el riego agronómico e hidráulicamente, fuese posible: i) sectorizar el sistema de riego de manera que se adaptase a la variabilidad espacial del suelo, ii) determinar el número de sensores de humedad que sería necesario instalar en la parcela (posiblemente, ligado a la sectorización) y, iii) decidir cuál sería el emplazamiento más adecuado de estos sensores de humedad para obtener datos representativos, en los que basar los momentos de riego y la recomendación de dosis.

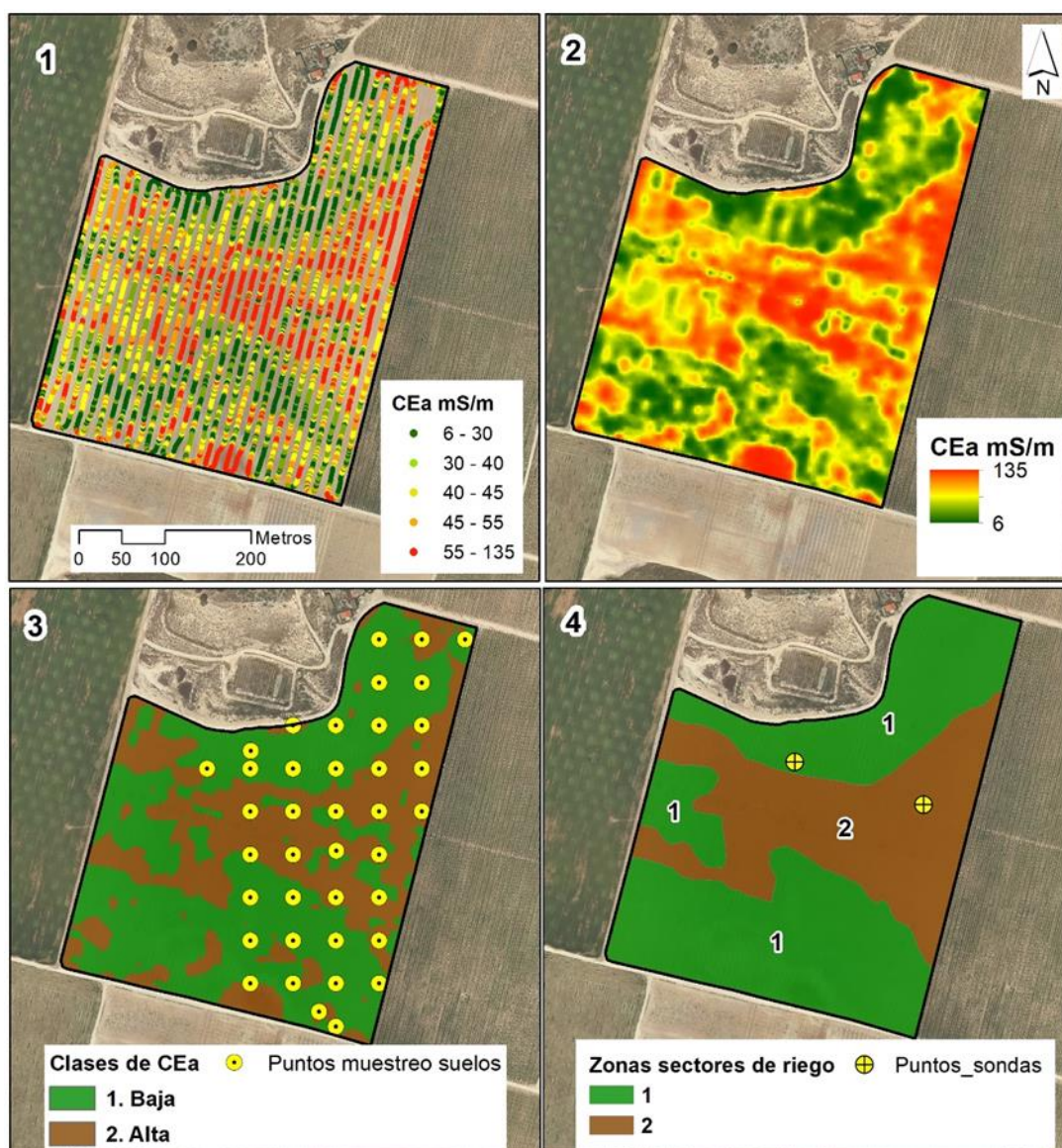
Un ejemplo de aplicación de sensores de CEa para este propósito es el desarrollado por el Grupo de Investigación en AgróTICA y Agricultura de Precisión de la Universitat de Lleida/Agrotecnio-CERCA Center en el proyecto LISA (Low Input Sustainable Agriculture, www.lisaproject.cat). En este proyecto, uno de los objetivos consistió en la propuesta de zonificación de una parcela próxima a plantarse con viña para la sectorización del riego, con el fin de que fuese posible la aplicación de dosis diferentes de agua y fertilizantes según la variabilidad de las propiedades de los suelos.

Esta investigación se llevó a cabo en Raimat (Lleida), en una parcela de 14,5 ha (Figura 11). La parcela presentaba un relieve ondulado (pendiente media del 8,1%), con un fondo de valle en el centro y mayor pendiente en las zonas norte y sur. Esta parcela había estado plantada anteriormente con viña de la variedad Tempranillo, con riego localizado. La heterogeneidad del vigor, rendimiento de las cepas y calidad de la uva del cultivo anterior llevó a pensar en la sectorización del riego adaptada a la variabilidad del suelo, con el fin de tratar de homogeneizar tanto el desarrollo del cultivo como la calidad de la uva en la nueva plantación.

La Figura 11.1 muestra el resultado de la cartografía de la CEa profunda (0-90 cm) mediante el sensor Veris 3100, donde con pasadas cada 15 m se consiguió una densidad de 435 puntos/ha. A partir de estos puntos, y mediante interpolación geoestadística, se creó el mapa de distribución continua de la CEa que se muestra en la Figura 11.2. En ella se aprecia como los valores más bajos se concentraban en las zonas norte y sur de la parcela, que es donde se daban las pendientes más elevadas y donde coincidía una menor profundidad de suelo. Los valores más altos se dieron en la parte central, que correspondía con el fondo de valle, es decir, con la zona donde se acumulaban las partículas más finas y donde los suelos eran más profundos y húmedos.

El muestreo y análisis tradicional de suelos según un patrón regular, en un marco de 50 x 50 m (Figura 11.3), pusieron de manifiesto una correlación significativa entre la CEa y el pH, la CE 1:5, la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD) y la capacidad de intercambio catiónico. Analizadas conjuntamente, estas propiedades del suelo explicaban el 90% de la variabilidad de la CEa. No obstante, como el interés se centraba en zonificar la parcela

para poder diseñar los sectores de riego de forma eficiente, se llevó a cabo un análisis de conglomerados (análisis clúster) utilizando el programa Management Zone Analyst (MZA, Fridgen *et al.*, 2004). El resultado para dos clases (clústeres) fue el que se muestra en la Figura 11.3. En este caso, la clasificación (Figura 11.3) y la posterior zonificación realizada (Figura 11.4) corroboraron la relación de la CEa con la capacidad de retención de humedad y el contenido de arcilla. Ambas propiedades fueron significativamente mayores en la zona 2 de la Figura 11.4 (24,3 % de humedad a -33 kPa y 26,7 % de arcilla), en comparación con la zona 1 (21,7 % de humedad a -33 kPa y 21,1 % de arcilla).



La relación entre la CEa y las propiedades que determinan la capacidad de retención de agua del suelo, como es el contenido de arcilla, indicaron que las zonas de CEa establecidas podían servir de apoyo para la delimitación de los sectores de riego (Figura 11.4). La localización de los puntos donde colocar las sondas de humedad (o puntos de seguimiento para el control del riego) es algo más difícil de objetivar. Normalmente, la localización de estos puntos de control suele decidirla el propio técnico de la finca en base a su experiencia e intuición. Sin embargo, aprovechando las 39 muestras de suelo que se habían llevado a cabo, fue posible optimizar el emplazamiento de las sondas de humedad aplicando un muestreo intencionado (*purposive sampling*, en su denominación inglesa) (Webster y Lark, 2013).

De forma resumida, el muestreo intencionado busca elegir aquellos puntos dentro de la parcela, en este caso dentro de cada zona de riego, que mejor representen las características del suelo de cada zona en cuestión. Siendo el contenido de arcilla significativamente distinto entre las zonas 1 y 2 (Figura 11.4), se trataba de elegir aquellos puntos cuyo contenido de arcilla se alejase lo menos posible de los valores que se obtendrían de esta misma propiedad una vez medida en las otras localizaciones dentro de la clase o zona respectiva. Según la teoría estadística del muestreo, un punto de estas características es aquél que consigue minimizar el error cuadrático medio de predicción (ECM). Habiéndose obtenido distintas muestras de suelo para las clases 1 y 2 dentro de la parcela (Figura 11.3), la localización (punto) dentro de cada zona de riego que cumplía la condición anterior era la que presentaba un contenido de arcilla con menor 'sesgo', es decir, con menor desviación respecto a la media de las muestras de la clase respectiva. Es cierto que este método, al requerir del muestreo de suelos previo en distintos puntos, añade un coste en tiempo y económico a todo el proceso, pero evita en cierto modo el sesgo asociado a la elección de estos puntos de control si se tuviese en cuenta únicamente el criterio subjetivo del observador.

4.3. Cartografía quasi 3D de la CEa

Si bien, como se ha visto, se han hecho grandes avances en la adquisición de datos en continuo de algunas propiedades de los suelos como la CEa y su posterior relación con otras propiedades de los suelos de interés, queda pendiente la caracterización de las propiedades de los suelos en 3D (Zhang *et al.*, 2017). Una posibilidad que se ha explorado por diferentes investigadores es la combinación de datos de CEa y un modelo de inversión de la señal. Con esta técnica, se pueden generar modelos bidimensionales de la CEa a intervalos de profundidad discretos, que simulan horizontes del suelo (Triantafilis *et al.*, 2013), es decir, una modelización quasi 3D. Un ejemplo de la aplicación de este tipo de modelización es el trabajo de Uribeetxebarria *et al.* (2018a) en la parcela frutícola localizada en Gimenells (Lleida) y ya mostrada en la Figura 5.

En esta parcela se pretendía cartografiar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo tanto espacialmente como en profundidad. Para ello, a partir de los datos de la CEa adquiridos por el sensor Veris 3100, se utilizó el programa para la modelización inversa de la señal (*invVERIS 1.1*, EMTOMO Lda., Monteiro Santos *et al.*, 2010). A partir de esta técnica, se obtuvo la CEa en estratos horizontales de 10 cm de espesor y cada 10 cm en profundidad, hasta los 90 cm máximos de la señal del sensor Veris 3100 (Figura 12 y Figura 13).

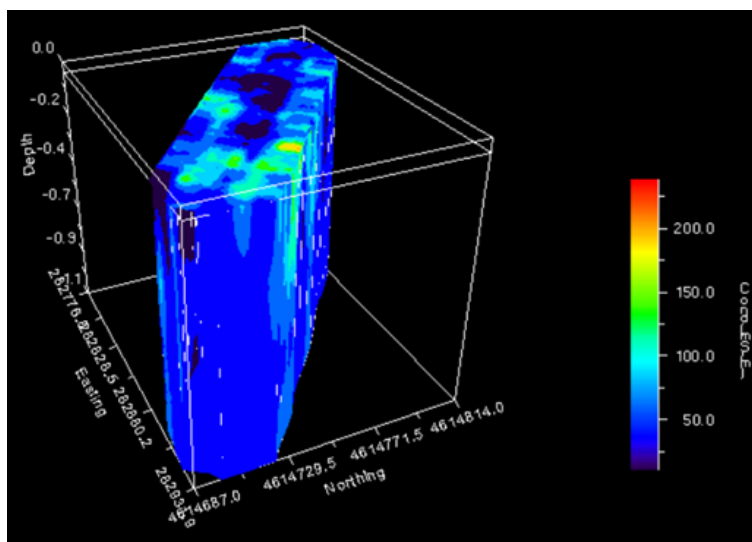


Figura 12. Modelo quasi 3D de la CEa del suelo interpolado cada 10 cm en profundidad con el programa invVERIS 1.1 (EMTOMO Lda.). La CEa de cada capa de 10 cm de espesor de suelo se muestra en la Figura 13. Fuente: elaboración propia a partir del programa InvVERIS 1.1.

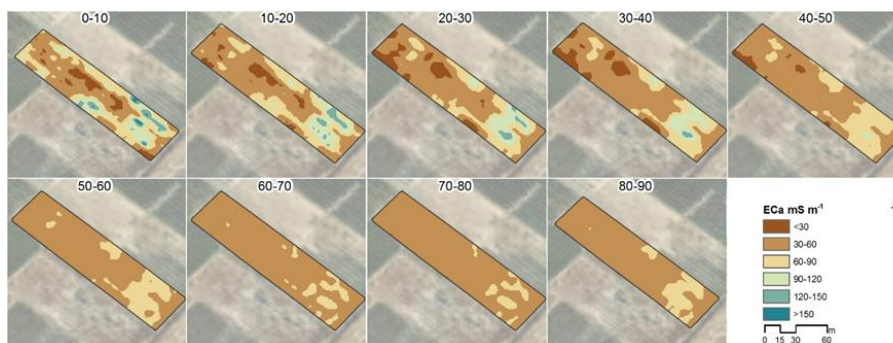


Figura 13. Capas de CEa del suelo en espesores de 10 cm estimados en profundidad mediante el programa de inversión de señal invVERIS 1.1 (EMTOMO Lda.). Los números en cada figura indican la profundidad de las capas de CEa en cm. Fuente: Uribeetxebarria et al. (2018a)

A partir de aquí, mediante un análisis de concordancia entre capas de CEa se sugirieron cuatro posibles patrones de variación espacial en profundidad: de 0-10 cm, de 10-20 cm, de 20-50 cm y de 50-90 cm; que podían evidenciar diferentes tipos de horizontes. Sin embargo, la interpretación de la CEa es compleja, y se recurrió a un análisis multivariante de la varianza para poner de manifiesto algunas relaciones entre la CEa y las propiedades de los suelos que, por otro tipo de análisis, no se manifestaban. De esta forma, Uribeetxebarria et al. (2018) concluyeron que la interpretación de los mapas de CEa con el objetivo de aplicarlos en recomendaciones de manejo diferenciado en Agricultura de Precisión debería basarse en análisis más complejos, pero más potentes al tener en cuenta simultáneamente distintas propiedades del suelo, y así poder inferir con mayor garantía cómo varía el suelo espacialmente dentro de las parcelas y también a lo largo del perfil.

5. Conclusiones

Los sensores de conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa), asociados a sistemas de geolocalización, son, hoy por hoy, la técnica que permite tener una mejor aproximación al

conocimiento de la variabilidad de las propiedades del suelo a escala de parcela. Constituye, por tanto, una tecnología de gran utilidad en aplicaciones de Agricultura de Precisión, ya que mediante este tipo de sensores se puede obtener una cartografía rápida y continua de esta propiedad que, posteriormente, puede correlacionarse con propiedades del suelo determinantes para el desarrollo de los cultivos. No obstante, aunque la CEa pueda servir como "proxy" de propiedades como la textura, la capacidad de retención de humedad, la capacidad de intercambio catiónico, etc., es importante remarcar que su correcta interpretación debe basarse en el muestreo y el análisis tradicional de suelos. Además, también es conveniente tener conocimientos edafológicos sobre los procesos y factores formadores que determinan la génesis de los suelos, que pueden servir de ayuda para explicar los datos analíticos; y también conocimientos agronómicos para la toma de decisiones adecuada.

La salinidad puede enmascarar la relación entre la CEa y las propiedades de los suelos como la textura o la capacidad de retención de humedad, por ejemplo. Por tanto, un mapa de CEa no puede convertirse directamente en un mapa de texturas, como habitualmente ha sido referido para este tipo de cartografía. Las relaciones e interacciones entre las propiedades físico-químicas de los suelos pueden ser muy complejas, lo que se ha puesto de manifiesto en algunos de los ejemplos mostrados en este capítulo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación obtenida en los proyectos de investigación AgVANCE (AGL2013-48297-C2-2-R, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad), LISA-Low Input Sustainable Agriculture (COMRD16-1-0031, Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea), PAgFRUIT (RTI2018-094222-B-I00, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades), ayuda 2017 SGR 646 (Secretaria d'Universitats i Recerca del Departament d'Empresa i Coneixement de la Generalitat de Catalunya) y el contrato de investigación con la empresa Ventafarinas, S.L., que han hecho posible llevar a cabo la investigación cuyos ejemplos se han mostrado en este artículo. También a los miembros del Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión de la Universitat de Lleida/Agrotecnio-CERCA Center (www.grap.udl.cat) que han participado en estos proyectos

Bibliografía

- Corwin, D.L., Lesch, S.M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95: 455–471.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 11–43.
- Dabas M. (2008). Fundamentals of the ARP© system. Comparison with the EM approach Application to large scale arch. sites. En: S. Campana, S. Piro (Eds.), *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology* (pp. 105-129). 1st ed. Taylor & Francis; London, UK.

2.23. *Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión*

- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J., Fraisse, C.W. (2004). Management Zone Analyst (MZA). *Agronomy Journal*, 96: 100-108.
- Gebbers, R., Luck, E., & Heil, K. (2007). Depth sounding with the EM38-detection of soil layering by inversion of apparent electrical conductivity measurements. En J.V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture' 07, Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture* (pp. 95–102). Wageningen, The Netherlands, Wageningen Academic Publishers.
- Gebbers, R., Lück, E., Dabas, M., Domsch, H. (2009). Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. *Near Surface Geophysics*, 2009: 179-190
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Käthner, J., Zude-Sasse, M. (2015). Interaction of 3D soil electrical conductivity and generative growth in *Prunus domestica* L. *European Journal of Horticultural Science*, 80: 231–239.
- Kühn, J., Brenning, A., Wehrhan, M., Koszinski, S., Sommer, M. (2009). Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 10: 490–507.
- Lund, E.D., Colin, P.E., Christy, D., Drummond, P.E. (1999). Applying soil electrical conductivity to precision agriculture. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture* (pp. 1089–1100), St. Paul, MN, July 19–22, 1998. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Martinez, G., Vanderlinden, K., Ordóñez, R., Muriel, J.L. (2009). Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon? *Vadose Zone Journal*, 8: 586–593.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Carrillo, G., Riba, A. (2017). Millora de la cartografia de sòls de Catalunya per aplicacions en agricultura de precisió mitjançant teledetecció. Documento científico-técnico relativo al proyecto Life Futur Agrari Life ENV/ES/000647. Universitat de Lleida, Lleida, 27 pp. No publicado.
- Monteiro Santos, F.A., Triantafilis, J., Taylor, R., Holladay, S., Bruzgulis, K.E. (2010). Inversion of conductivity profiles from EM using full solution and a 1-D laterally constrained algorithm. *Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 15: 163-174.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R.M. (2008). *Introducción a la Edafología: uso y protección del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S. (1999b). *Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements*. FAO Irrigation and Drainage Paper #57. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italia.
- Santos, F.A., Triantafilis, J., Bruzgulis, K.E., Roe, J.A. E. (2010). Inversion of Multiconfiguration Electromagnetic (DUALEM-421) Profiling Data Using a One-Dimensional Laterally Constrained Algorithm. *Vadose Zone Journal*, 9: 117–125.

- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O.A., McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27: 171 – 197.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Wiebold, W.J. (2003). Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 95: 472–482.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Wiebold, W.J., Batchelor, W.D., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Clay, D.E., Palm, H.L., Pierce, F.J., Schuler, R.T., Thelen, K.D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 263–283.
- Triantafyllis, J., Terhune IV, C.H., Monteiro Santos, F.A. (2013). An inversion approach to generate electromagnetic conductivity images from signal data. *Environmental Modelling & Software*, 43: 88-95.
- Uribeetxebarria, A., Arnó, J., Escolà, A., Martínez-Casasnovas, J.A. (2018a). Apparent electrical conductivity and multivariate analysis of soil properties to assess soil constraints in orchards affected by previous parcelling. *Geoderma*, 319:185–193.
- Uribeetxebarria, A., Daniele, E., Escolà, A., Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J.A. (2018b). Spatial variability in orchards after land transformation: Consequences for precision agriculture practices. *Science of the Total Environment*, 635: 343–352.
- Webster, R., Lark, M. (2013). *Field sampling for environmental science and management*. Routledge, 192 pp.
- Zhang, G.L, Liu, F., Song, X.D. (2017). Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 16: 2871-2885.