

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura



1. Introducción

2. ¿Qué es la Inducción Electromagnética?

3. ¿Cómo se realizan las Mediciones?

4. Aplicaciones

5. Conclusiones



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL



Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional

Uso de sensores de inducción electromagnética en la agricultura. / [García-Esteba, MC., Martínez-García G., Pedrera-Parrilla, A., Vanderlinden, K.] - Córdoba. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2019. 1-23 p. Formato digital (e-book) - (Agricultura y Medio Ambiente)

Conductividad eléctrica aparente - DUALEM-215 - Inducción electromagnética - Inversión - Propiedades del suelo - Salinidad

Se agradece la colaboración de M. Morón y J.C. Cuerva del IFAPA Centro Las Torres y de M. Ramos y M. Armenteros del IFAPA Centro Alameda del Obispo en el desarrollo de los trabajos expuestos en este documento. Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos AGL2015-65036-C3-R (MINECO/FEDER, EU) y AVA201601.13 (IFAPA/ FEADER, EU), cofinanciados al 80% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, dentro del Programa Operativo FEDER de Andalucía 2014-2020.



Este documento está bajo licencia Creative Commons.
Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es>

Uso de sensores de inducción electromagnética en la agricultura.

© Edita JUNTA DE ANDALUCÍA. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.
Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural.
Córdoba, enero 2019.

Autoría:

M^a Carmen García Estepa¹
Gonzalo Martínez García²
Aura Pedrera Parrilla¹
Karl Vanderlinden Herregods¹

¹ IFAPA, Centro Alameda del Obispo, Córdoba

² Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Córdoba, Córdoba

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

1.- Introducción

La variabilidad espacial del suelo es el resultado de la compleja interacción entre el relieve, el material parental, el clima, la vegetación y los organismos durante el proceso de formación de éste. Durante siglos la agricultura ha sabido conciliarse con esta variabilidad intrínseca, pero la progresiva industrialización de la agricultura durante el siglo pasado y el cambio de escala de trabajo que implica hicieron que se obviara.

La creciente concienciación medioambiental y la necesidad de realizar un uso más racional de insumos y recursos para alcanzar una agricultura rentable y más sostenible dieron lugar al paradigma de la “**Agricultura de Precisión**”, en la que se realizan las labores agrícolas de forma diferenciada en función de las necesidades específicas del cultivo en cada momento y en cada punto de la parcela. Es en este contexto que surgió también el uso de la **inducción electromagnética**, primero para medir la conductividad eléctrica del suelo en estudios de salinidad, y posteriormente como herramienta genérica para cuantificar la variabilidad del suelo en aplicaciones de Agricultura de Precisión y apoyándose en sistemas de posicionamiento global, accesibles a partir de los años 90, para georreferenciar las mediciones realizadas y así facilitar el desarrollo de cartografías (Fig. 1).

Gracias a los avances tecnológicos, hoy en día la inducción electromagnética se ha convertido en una tecnología con un suficiente grado de madurez para ser usado de forma rutinaria en numerosas aplicaciones agrícolas. El objetivo de esta publicación es acercar esta tecnología a los distintos sectores productivos y dar a conocer a modo de ejemplo distintas aplicaciones de la inducción electromagnética en la agricultura.



Figura 1. Medición con un sensor de inducción electromagnética (EM38-DD) en un olivar.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

2.- ¿Qué es la Inducción Electromagnética?



Figura 2. Medición de la CEa del suelo con un sensor de inducción electromagnética (DUALEM-21S), integrado en una plataforma móvil dotada de sistema de posicionamiento GPS-RTK.

Los sensores de inducción electromagnética (IEM) miden la conductividad eléctrica aparente (CEa) de distintos volúmenes de suelo en función de la configuración interna del sensor. La respuesta del sensor dependerá de la capacidad de los componentes del suelo para transmitir corriente eléctrica a través de ellos. Dado que varias propiedades del suelo relevantes para la agricultura y el desarrollo de los cultivos, tales como la concentración de solutos en la solución del suelo, el contenido en arcilla o la humedad, también influyen en la capacidad del mismo para transmitir corriente eléctrica, la CEa se puede considerar un indicador genérico para la capacidad productiva del suelo. Su facilidad de medición (Fig. 2) lo ha convertido en una técnica muy popular para caracterizar la variabilidad espacial del suelo y apoyar la implementación de técnicas de agricultura de precisión.

Ventajas

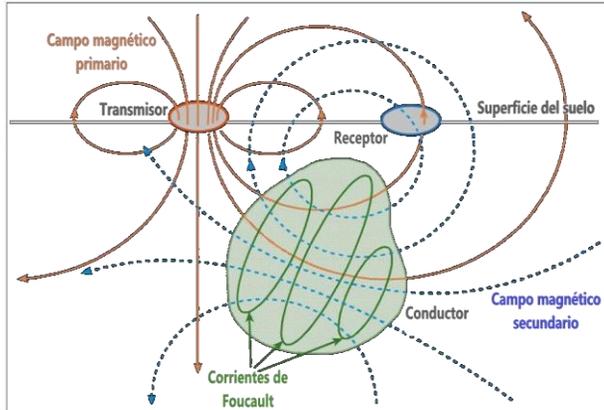
- Fácil de usar y movilizar en el campo
- No requiere contacto físico con el suelo
- No intrusivo, no destructivo
- Permite abarcar grandes superficies en poco tiempo
- Especialmente apto para suelos pedregosos, duros y secos en terreno rugoso

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

2.-¿Qué es la Inducción Electromagnética?

El principio físico bajo el que funcionan los sensores de inducción electromagnética consiste en la transmisión de un campo electromagnético primario que induce corrientes eléctricas en el suelo. Estas corrientes generan un campo magnético secundario que son captadas por las bobinas receptoras.

La conductividad eléctrica del suelo se mide como la relación entre las intensidades del campo magnético primario y el secundario (Fig. 3)



- Principales propiedades del suelo que influyen en la medida de CEa:**
- Textura del suelo
 - Concentración de electrolitos disueltos
 - Humedad del suelo
 - Porosidad
 - Temperatura

Figura 3. Esquema del principio de electromagnetismo (Sheriff, 1989).

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

3.- ¿Cómo se realizan las Mediciones?

En función del número de bobinas y su configuración, los sensores de inducción electromagnética miden la CEa para distintas profundidades de exploración. El DUALEM-21S es un sensor de inducción electromagnética multiseñal que consiste en un tubo que contiene una bobina transmisora en uno de sus extremos y, a 1, 1.1, 2 y 2.1 metros de ésta, 4 bobinas receptoras (Fig. 4; Tabla 1). El sensor se aloja en un trineo de PVC para desplazarlo sobre la superficie del suelo (Fig. 5)

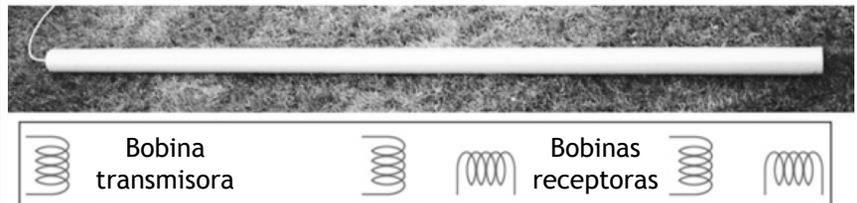


Figura 4. Sensor de inducción electromagnética DUALEM-21S y esquema de la disposición de las bobinas en su interior (Saey y col., 2009).

Tabla 1. Resumen de las distintas configuraciones de bobinas, su denominación y su profundidad de exploración.

Orientación de la bobina	Distancia entre bobinas (m)	Profundidad de exploración (m)	Denominación de la señal
Horizontal	1	1.5	HCP 1
Perpendicular	1.1	0.5	PRP 1.1
Horizontal	2	3	HCP 2
Perpendicular	2.1	1	PRP 2.1



Figura 5. Detalle del trineo en el que se desplaza el sensor de inducción electromagnética (DUALEM-21S) sobre la superficie del suelo.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

3.- ¿Cómo se realizan las Mediciones?

Profundidad de exploración

La profundidad de medida del sensor depende de la distancia entre las bobinas transmisora y receptora y de su orientación, según las curvas de respuesta acumulativa, R (Figs. 6. y 7.)

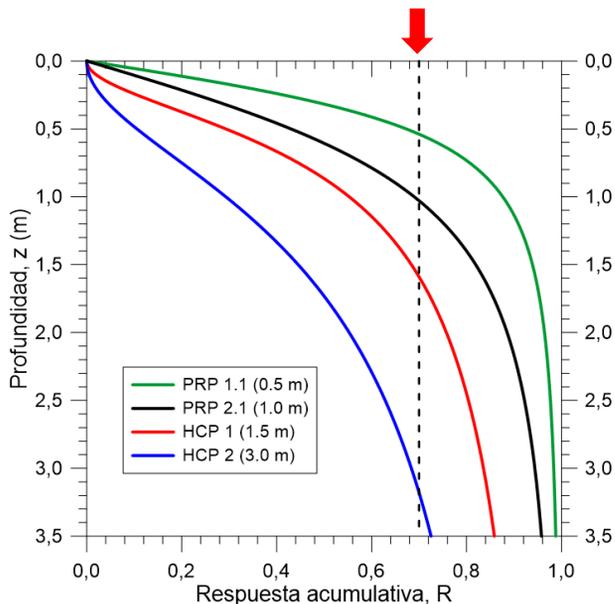


Figura 6. Funciones de respuesta de cada una de las cuatro señales del sensor DUALEM-215. La línea discontinua y la flecha roja indican el 70% de la respuesta acumulativa.

Se establece la profundidad de exploración de cada señal como la profundidad a la que se obtiene el 70% de la respuesta del sensor. A dicha respuesta contribuye todo el volumen de suelo que está por encima de dicha profundidad.

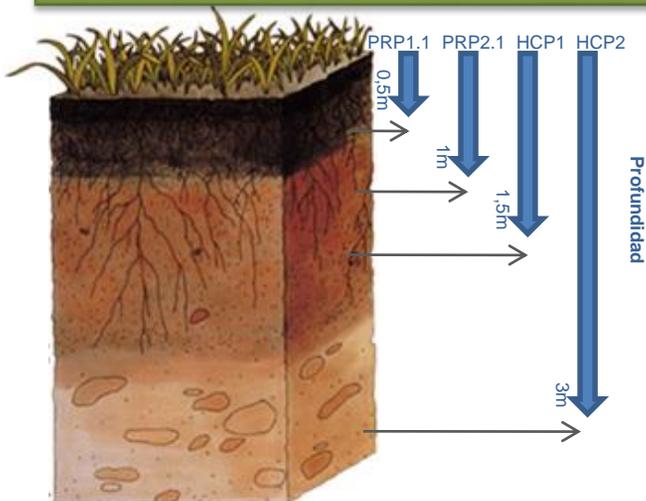


Figura 7. Volumen de suelo explorado por cada combinación de bobinas.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

3.- ¿Cómo se realizan las Mediciones?

La medición en campo se realiza con una plataforma móvil que consiste en un trineo construido en PVC sobre el que se sitúa el sensor de inducción electromagnética (DUALEM-21S) y que se arrastra con un vehículo todoterreno ATV, equipado con un sistema de posicionamiento GPS-RTK de precisión centimétrica (Fig. 8). El vehículo se desplaza en líneas paralelas a una velocidad entre 5 y 10 km/h, realizando aproximadamente cada metro una medida georeferenciada (incluyendo la cota) y obteniendo los cuatro valores de CEa correspondientes a las cuatro profundidades de exploración.



Figura 8. Plataforma móvil de medición de la CEa. El sensor DUALEM-21S se sitúa en el interior del tubo gris del trineo (1). Al fondo a la izquierda se observa la estación base del sistema GPS-RTK (2)

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

3.- ¿Cómo se realizan las Mediciones?

En gabinete se realiza un postprocesado de los datos, que consiste en un filtrado y la comprobación de su consistencia espacial. Posteriormente, usando **métodos geostatísticos de interpolación**, se generan los mapas de CEa para distintas profundidades de exploración (Fig.10).

Para la caracterización vertical del suelo se estima, mediante **métodos de inversión**, la conductividad real (CE) en cualquier punto de un perfil del suelo a partir de los valores de CEa correspondientes a las cuatro señales del sensor. De esta forma se obtiene una imagen bidimensional de la conductividad del suelo. En la Fig. 9 se representa la imagen de la conductividad eléctrica del suelo, correspondiente a la recta A-B de la Fig.10. IFAPA ofrece los servicios de medición, postprocesado e inversión de la CEa.

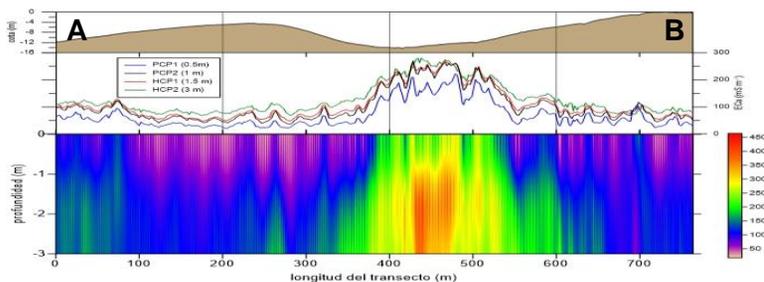


Figura 9. Imagen de la conductividad eléctrica real (CE) del perfil del suelo generada mediante inversión de datos de CEa medidos en la superficie del suelo a lo largo de la recta A-B (Fig. 10).

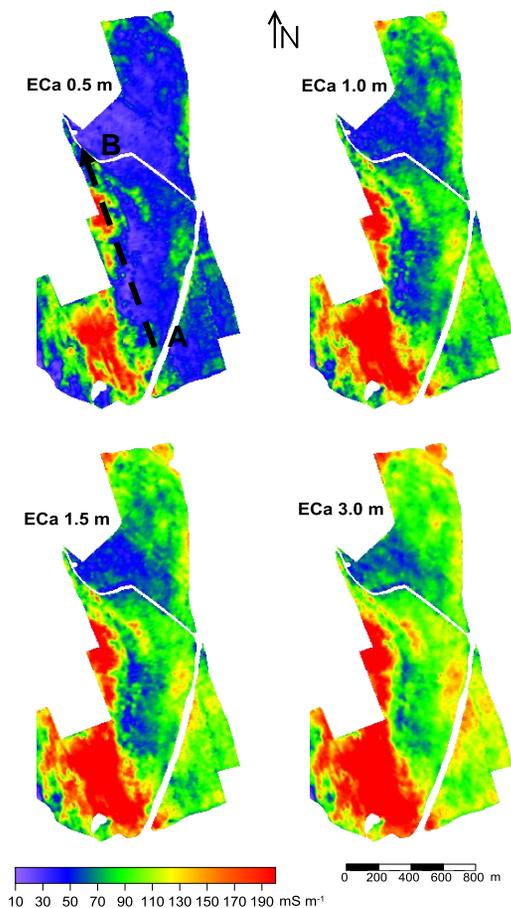


Figura 10. Mapas de CEa en miliSiemens por metro (mS m^{-1}) para distintas profundidades de exploración.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones

Son numerosas las aplicaciones que los sensores de inducción electromagnética pueden tener en distintos sectores de la agricultura andaluza, en los que se requiere la estimación de propiedades del suelo tales como la salinidad, la humedad o el contenido de materia orgánica. A través de diversos ejemplos se mostrará el potencial de esta tecnología.

Aplicaciones

- Evaluación *in situ* de ensayos agronómicos
- Delimitación de zonas de manejo homogéneas
- Evaluación de la salinidad del suelo
- Estimación del contenido de materia orgánica
- Seguimiento de la humedad del suelo
 - Estimación de las propiedades del suelo para diseñar un sistema de riego
 - Estimación de la humedad bajo un árbol



Figura 11. Medición de la CEa con el sensor de inducción electromagnética DUALEM-21S en una dehesa

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Evaluación *in situ* de Ensayos Agronómicos

En un experimento llevado a cabo desde el año 1982 en una finca del IFAPA (Tomejil, Carmona) para estudiar diferentes sistemas de manejo del suelo, se realizaron 13 mediciones con un sensor de IEM entre 2006 y 2009. Se ha utilizado un sensor EM38-DD que consta de dos dipolos superpuestos perpendicularmente, con profundidades de exploración de 0.75 m (CE_{as}) y 1.5 m (CE_{ad}).

El ensayo se lleva a cabo en una rotación trigo-girasol-leguminosa de secano donde se comparan tres distintas técnicas de laboreo: laboreo tradicional (CT), mínimo laboreo (MT) y siembra directa (DD) (Figs. 12 y 13). El suelo es un vertisol, con una textura uniforme (60% arcilla).

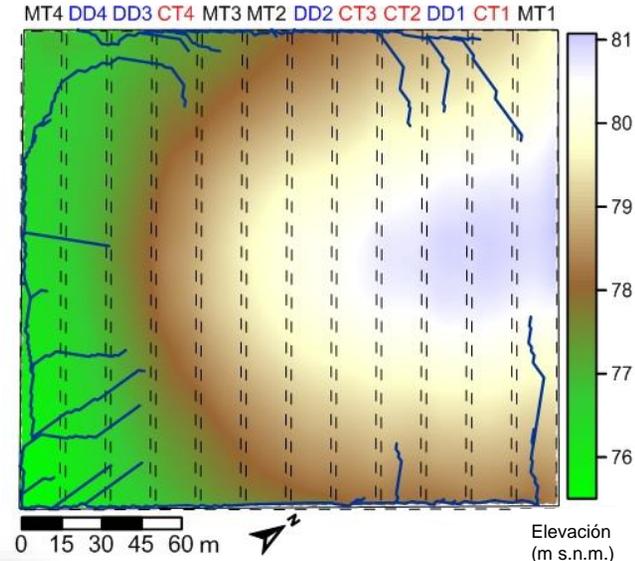


Figura 12: Mapa de elevaciones del terreno (en metros sobre el nivel del mar) y configuración de las parcelas elementales del ensayo.



Figura 13: Imagen de la parcela de ensayo, donde se aprecia el aspecto diferenciado de las parcelas de laboreo tradicional (CT2, CT3 y CT4; Fig. 12).

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Evaluación *in situ* de Ensayos Agronómicos

Ante la dificultad de poder comparar objetivamente las medidas de CEa en el tiempo (distinta humedad del suelo) se realiza una transformación de los datos que permite comparar los patrones de CEa para diferentes fechas de medición. Esto permite evaluar el efecto combinado del sistema de laboreo, la topografía y la precipitación. En el ejemplo que se muestra a continuación se evalúa el efecto de una lluvia de alta intensidad. La figura 14 muestra los patrones de CE_{as} (correspondientes a fechas anteriores y posteriores a un episodio de intensa precipitación de 115 mm/12 h). En la Fig. 14 b) no se aprecia aparentemente ningún efecto del manejo del suelo en el patrón de la CEa tras la intensa precipitación.

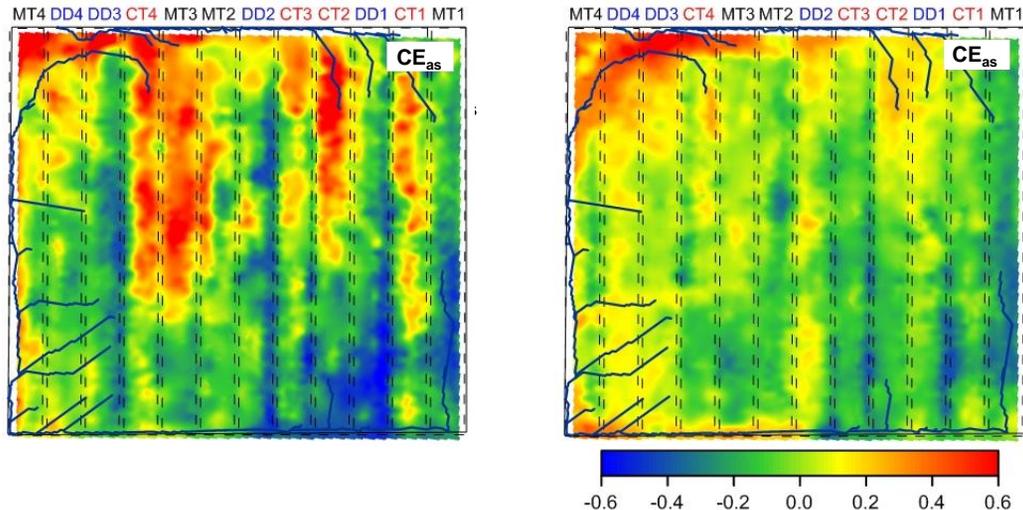


Figura 14: Patrón espacial de la CE_{as} (0.75 m), a) antes y b) después de un episodio de intensa precipitación.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Evaluación *in situ* de Ensayos Agronómicos

En cambio, el análisis de la diferencia de los dos mapas de la figura 14 (Fig.15) muestra que los incrementos de CEa transformada son mayores en las parcelas sometidas a siembra directa (DD) como resultado de su mayor contenido de agua, para las dos profundidades de exploración consideradas (CE_{as}: 0.75 m y CE_{ad}: 1.5 m).

El mayor contenido de agua en DD es el resultado de la mayor infiltración en este sistema de manejo, favoreciendo la recarga del perfil del suelo y evitando la escorrentía, en contraste con las parcelas sometidas a laboreo tradicional (CT) y mínimo laboreo (MT) donde se observó una acumulación de sedimentos al pie de las parcelas como consecuencia de la escorrentía (Fig. 16).

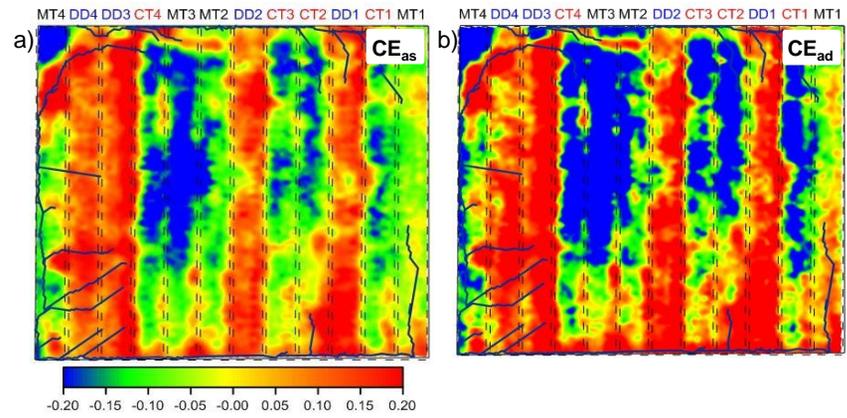
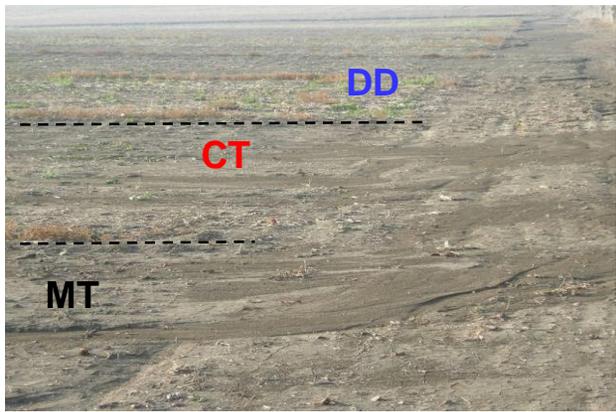


Figura 16. Detalle de la acumulación de sedimentos al pie de las parcelas elementales de CT y MT

Figura 15: Mapas de diferencia de la CEa transformada para profundidades de exploración de: a) 0.75 m (CE_{as}), y b) 1.5 m (CE_{ad}).

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Delimitación de Zonas de Manejo

En un olivar en el que el arbolado se desarrolla de forma no uniforme se llevó a cabo una delimitación de zonas de manejo. Al caracterizar el suelo de la parcela mediante un mapa de CEa, es posible identificar áreas con similar conductividad que se relacionan con los tres patrones de subsuelo que se observan en la parcela:

- 1 Zonas con el contenido más alto en arena y un contenido creciente de arcilla con la profundidad
- 2 Zonas con el contenido más bajo en arcilla y contenido creciente de arena con la profundidad del suelo
- 3 Zonas con alto contenido en arcilla y bajo porcentaje de arena en todo el perfil del suelo.

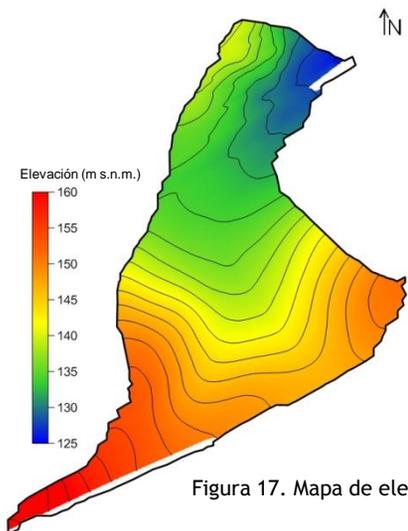


Figura 17. Mapa de elevaciones

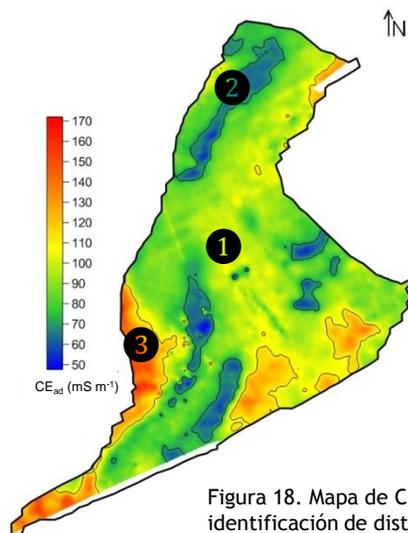


Figura 18. Mapa de CEa con la identificación de distintas zonas

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Delimitación de Zonas de Manejo

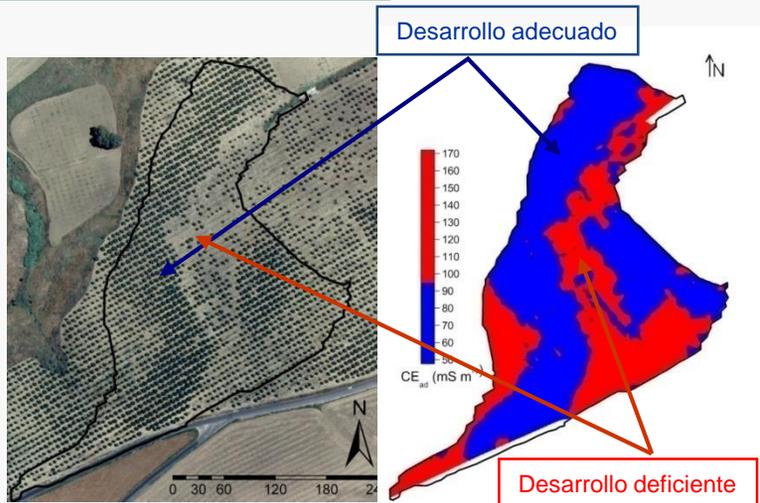


Figura 19. Correspondencia entre los patrones de vegetación y suelo

El mapa de CEa muestra que existe una relación entre la CEa y el contenido de arcilla del subsuelo, que puede generar condiciones de drenaje deficiente, especialmente cerca de la vía principal de drenaje. Estas condiciones afectan negativamente al crecimiento de los olivos, contribuyen a la aparición de enfermedades (Fig. 20a), o causan la muerte de los árboles (Fig. 20b) por asfixia radicular. No obstante en zonas de baja CEa se observa un desarrollo adecuado (Fig. 20c).

La caracterización mediante la medición de la CEa del suelo nos permite explicar las relaciones entre los patrones de suelo y vegetación sin necesidad de exhaustivas tomas de muestras. También se puede dilucidar cómo estos patrones contribuyen a la escorrentía y la sedimentación.

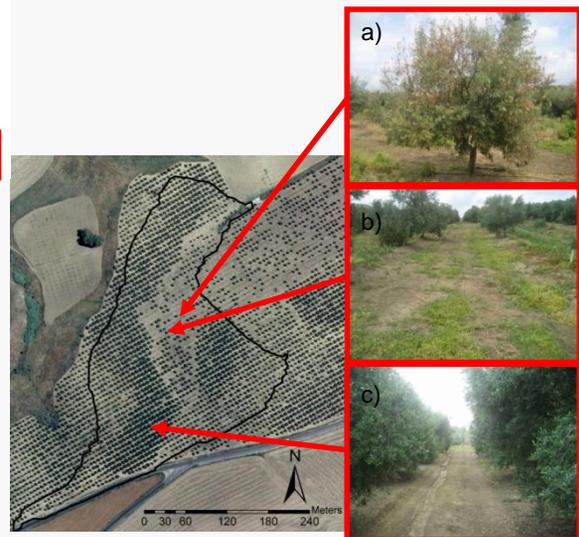


Figura 20. Patrones de vegetación observados en la parcela.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Evaluación de la Salinidad del Suelo

En una parcela situada en el Bajo Guadalquivir (Lebrija), con problemas de salinidad y una capa freática salina somera estudiamos mediante la medición con el sensor de IEM cómo se distribuye la salinidad horizontal y verticalmente en el suelo. Después de medir la CEa con el sensor en toda la superficie de la parcela (Fig. 21), se generan los mapas correspondientes para cuatro profundidades de exploración: 0.5, 1, 1.5 y 3 metros (Fig. 22).



Figura 21. Medición de la CEa con el sensor DUALEM-21S en una parcela del Sector BXII, Lebrija

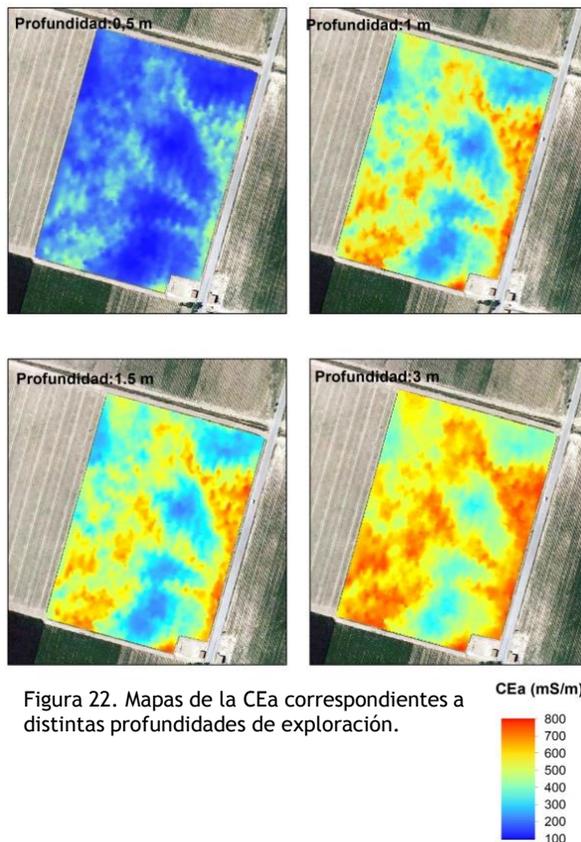


Figura 22. Mapas de la CEa correspondientes a distintas profundidades de exploración.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Evaluación de la Salinidad del Suelo

En el transecto (recta en amarillo) que se muestra en la Fig. 23 se midió la CEa y se recogieron en 5 puntos muestras de suelo (indicados en rojo) que fueron analizadas en laboratorio. Mediante inversión (postprocesado) de los datos de CEa se estimó la distribución vertical de la conductividad real del suelo (CE) a lo largo del transecto, tal como se aprecia en la Fig. 24. La figura 25 muestra la buena correspondencia entre la CE y la conductividad eléctrica medida en extracto de pasta saturada (CEe). Estableciendo una relación entre ambas variables permite transformar la imagen de la Fig. 24 en una imagen de CEe.



Figura 23. Posición del transecto con mediciones de CEa y los puntos de muestreo de suelo en la parcela experimental

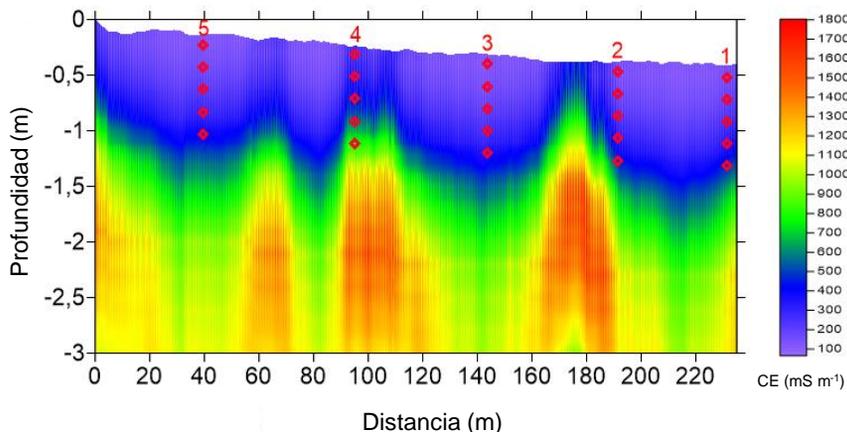


Figura 24. Imagen de la conductividad eléctrica real del suelo (CE) a lo largo del transecto mostrado en la Fig. 23 y posición de las muestras de suelo analizadas en laboratorio.

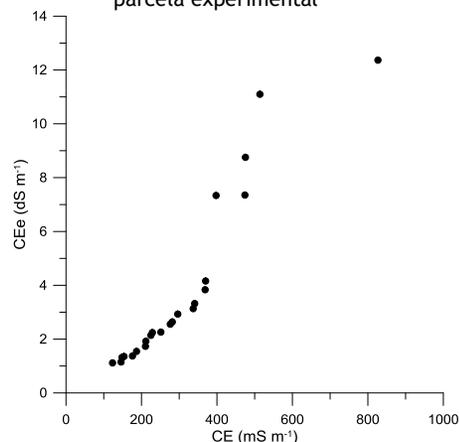


Figura 25. Relación entre la CE estimada con inversión de CEa y la conductividad medida en pasta saturada en laboratorio (CEe).

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Estimación del Contenido de Materia Orgánica

En un estudio realizado en una finca en Setenil de las Bodegas, en la sierra de Cádiz, reconvertida de dehesa a olivar en los años 90 (Fig. 26), se estimó el contenido de materia orgánica a distintas profundidades en el perfil del suelo a partir de mediciones de la CEa.

El análisis de los mapas de conductividad hasta los 0.8 m de profundidad (Fig. 27) muestra que el contenido en materia orgánica es mayor en zonas de pendiente suave y decreciente con la profundidad.

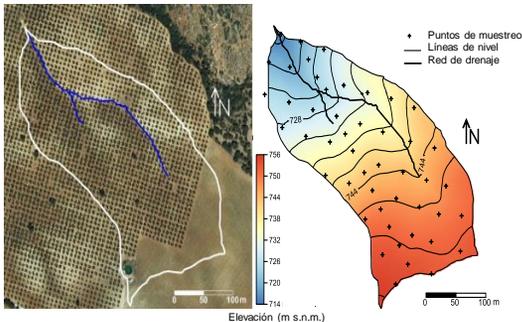


Figura 26. Imagen de la zona de estudio, delimitación de la cuenca experimental y mapa de elevaciones

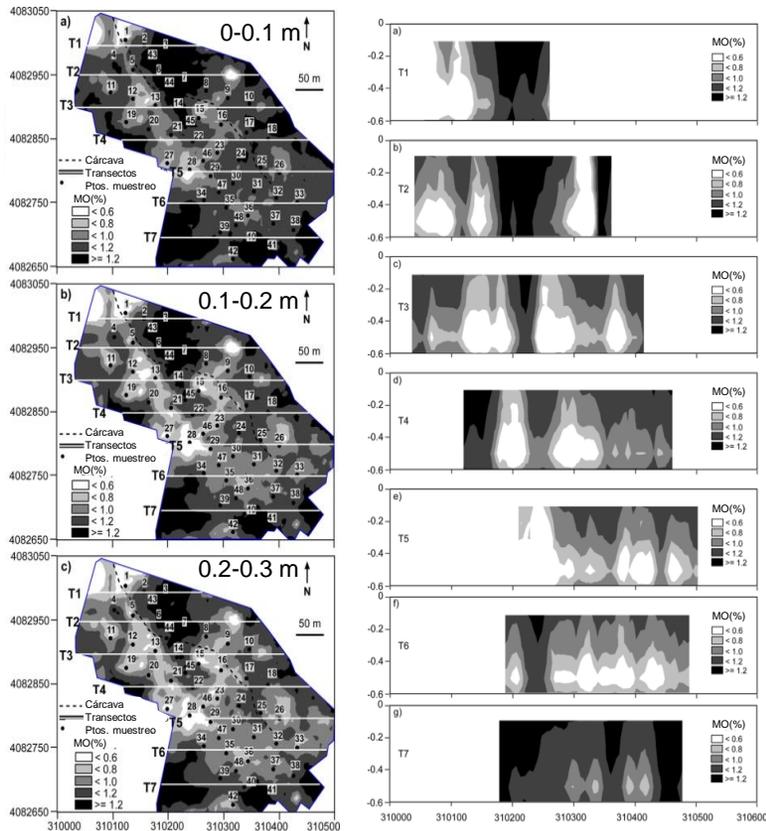


Figura 27. Izq.: Caracterización horizontal del contenido en materia orgánica (MO) para horizontes de 0-0.1, 0.1-0.2 y 0.2-0.3 m. Der.: Distribución vertical del contenido en materia orgánica en el perfil de distintas secciones

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Estimación de las Propiedades del Suelo

En un estudio realizado en una parcela de olivar en Écija (Sevilla) se midió la CEa con el fin de elaborar **mapas de prescripción de riego**. La zonificación de la parcela en función de la variabilidad de la textura y otras propiedades del suelo permite implementar técnicas de riego variable, teniendo en cuenta el almacenamiento de agua en el perfil del suelo de cada zona (Fig. 29).



Figura 28. Medición de la CEa en un olivar con el sensor de inducción electromagnética (DUALEM-215).

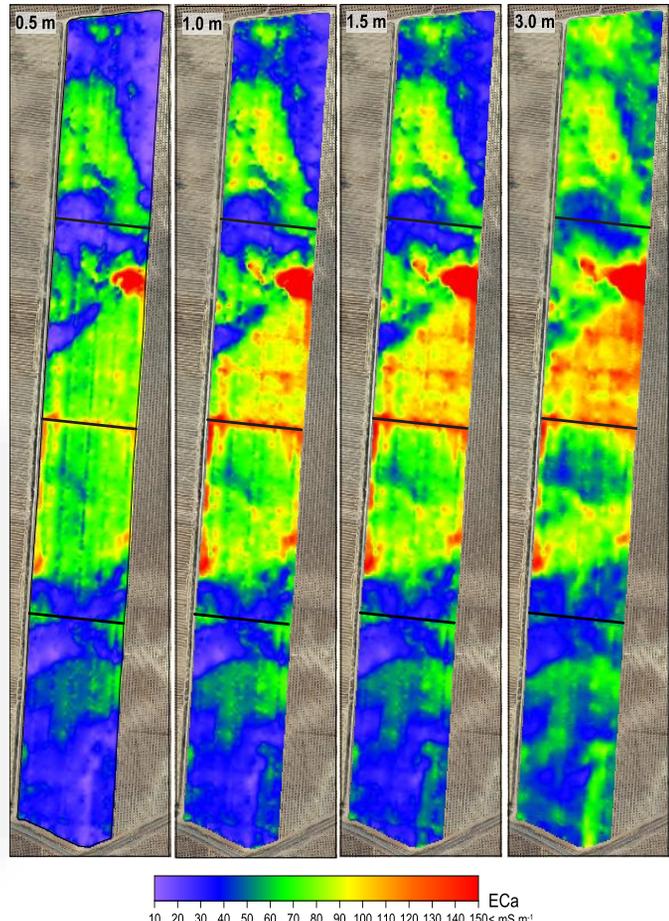


Figura 29. Mapas de CEa para distintas profundidades de exploración que reflejan la variabilidad espacial de las propiedades del suelo

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Estimación de la Humedad del Suelo bajo un Olivo

En un experimento realizado en el Centro IFAPA Alameda del Obispo (Córdoba) se estimó la evolución de la humedad del suelo bajo un olivo a partir de mediciones de la CEa (Fig. 30). Al pie del olivo se instaló en una zanja a un conjunto de sensores de humedad a distintas profundidades que proporcionaron valores cada cinco minutos (Fig. 31). En el lado opuesto del olivo se midió con el sensor de inducción electromagnética la CEa a distintas distancias del tronco en distintas fechas.



Figura 30. Plataforma usada para realizar periódicamente las mediciones de la CEa con el sensor DUALEM-21S.



Figura 31. Conjunto de sensores de humedad instalados en una zanja bajo el olivo estudiado.

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

4.- Aplicaciones: Estimación de la Humedad del Suelo bajo un Olivo

Invirtiendo los datos de CEa y estableciendo una relación entre la conductividad y la humedad el suelo se obtuvieron imágenes de la humedad en el perfil del suelo. La figura 32 muestra para distintas fechas la buena correspondencia entre la humedad del suelo estimada con sensores de humedad y la estimada a partir de los datos de CEa. Ciertas diferencias se pueden atribuir a la asimetría en la arquitectura de la copa del olivo y diferencias en las propiedades del suelo a ambos lados del olivo, condicionando los patrones de CEa y de humedad en el perfil del suelo.

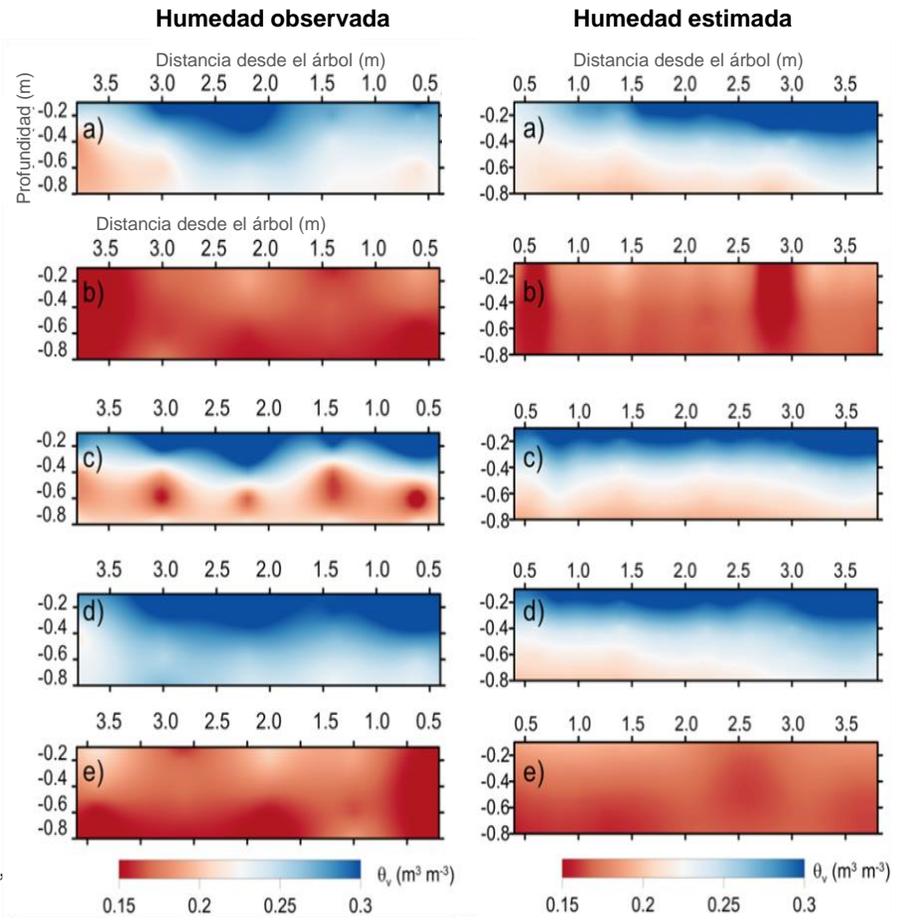
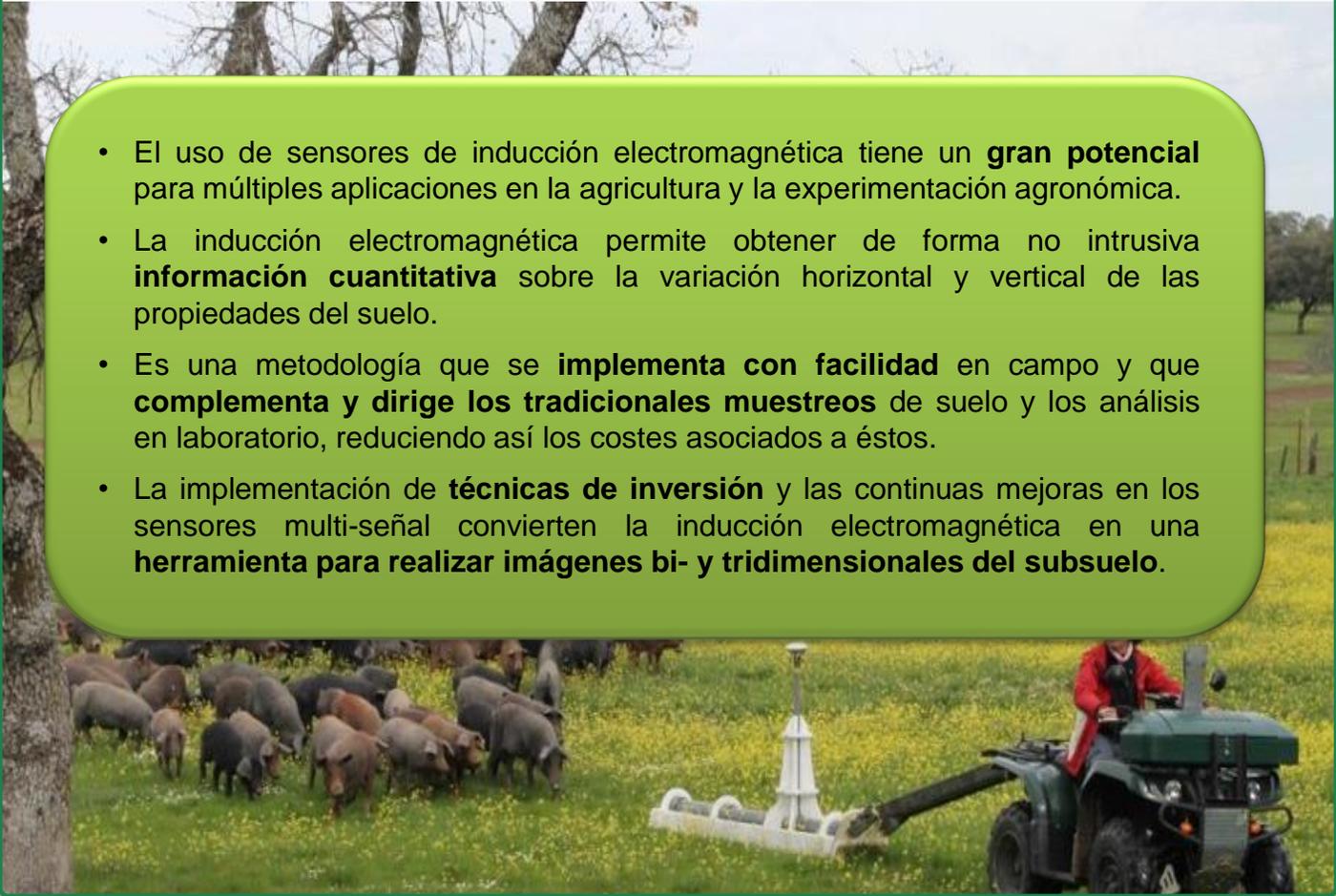


Figura 32. Humedad observada (columna izquierda) y estimada a partir de la inversión de la CEa (columna derecha) en 5 fechas (a, b, c, d, e).

Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

5.- Conclusiones

- El uso de sensores de inducción electromagnética tiene un **gran potencial** para múltiples aplicaciones en la agricultura y la experimentación agronómica.
- La inducción electromagnética permite obtener de forma no intrusiva **información cuantitativa** sobre la variación horizontal y vertical de las propiedades del suelo.
- Es una metodología que se **implementa con facilidad** en campo y que **complementa y dirige los tradicionales muestreos** de suelo y los análisis en laboratorio, reduciendo así los costes asociados a éstos.
- La implementación de **técnicas de inversión** y las continuas mejoras en los sensores multi-señal convierten la inducción electromagnética en una **herramienta para realizar imágenes bi- y tridimensionales del subsuelo**.



Uso de Sensores de Inducción Electromagnética en la Agricultura

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera

Avenida de Grecia s/n
41012 Sevilla (Sevilla) España
Teléfonos: 954 994 595 Fax: 955 519 107



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL

