

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO Y EL NDVI EN SUELO DE MARISMA RECUPERADA EN EL SECTOR B-XII, LEBRIJA (SEVILLA)

M. Ramos Rodríguez¹, M. Farzaman², J.L. Gómez Flores¹, A. González Jiménez¹, B. Salvatierra Bellido³, G. Martínez-García⁴, K. Vanderlinden¹

¹IFAPA Centro Alameda del Obispo, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, España.

²Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Oeiras, Portugal.

³IFAPA Centro Rancho de la Merced, Cádiz, España.

⁴Departamento de Física Aplicada, Radiología y Medicina Física, Universidad de Córdoba, Córdoba, España.

RESUMEN. El objetivo de este trabajo es proponer una metodología específica para estimar la relación entre la salinidad del suelo e índices de cultivo obtenidos por teledetección a escala de parcela en el sector de riego B-XII (Lebrija, Sevilla), para apoyar la toma de decisiones en cuanto al manejo de suelo, agua y cultivo. Se realizaron mediciones con un sensor de inducción electromagnética (IEM) multiseñal que permite producir imágenes bi- y tridimensionales de la distribución de la conductividad eléctrica del suelo que mostraba una buena relación con los indicadores de salinidad del suelo ($R^2 > 70\%$). Se realizó el estudio en una parcela con deficiencias en el sistema de drenaje y considerando un historial de cultivo de 7 años. Se evalúa la eficacia y las limitaciones de esta metodología para estimar la salinidad del suelo y se compara con información proporcionada por sensores remotos, encontrando una relación inversa entre el NDVI y la CE que muestra los efectos del suelo en el desarrollo del cultivo, permitiendo la identificación de zonas excesivamente húmedas con problemas de drenaje y salinización puntual causando un deterioro en el desarrollo del cultivo

ABSTRACT. The objective of this work is to propose a specific methodology to estimate the relationship between soil salinity and cultivation indices obtained by remote sensing at the plot scale in the irrigation sector B-XII (Lebrija, Seville), to support decision-making of the different agents ensuring agricultural sustainability. Measurements were made between 2020-2021 with a multisignal electromagnetic induction sensor (IEM) that allows the production of two-dimensional images of the distribution of the electrical conductivity of the soil with a large ratio of the soil salinity / sodicity indicators ($R^2 > 70\%$), in a plot with different cultivation histories, different irrigation systems and deficiencies in its drainage system, accompanied by soil sampling campaigns to measure the main parameters of salinity / sodicity in the laboratory. The efficacy and limitations of this methodology to estimate soil salinity are evaluated, assessing the possibility of using indicators that are simpler to measure, such as the electrical conductivity of the soil-water solution, exploring their relationships with the traditional parameters of salinity / sodicity.

Likewise, the development of the crop by remote sensing is analyzed between 2017-2021, and how it is related to the spatial pattern of the IEM signals. An optimized methodology is proposed to estimate the deficiencies in the plot's drainage system from the IEM measurement and remote sensing, in order to safeguard the long-term sustainability of this agro-system.

1.- Introducción

La creciente diversificación de cultivos requiere la implementación de nuevos sistemas de manejo de suelo y agua que distan de los que se recomiendan tradicionalmente para suelos salinos lo que, en combinación con alteraciones del régimen pluviométrico debido a la creciente variabilidad climática, puede alterar los delicados equilibrios de su balance hidroquímico y traer consecuencias negativas para su funcionalidad y la producción agrícola (Assouline et al., 2015; Hopmans et al., 2021). Tal situación requiere un seguimiento de las características del suelo para detectar el posible deterioro de su calidad, lo que tradicionalmente se ha realizado en base a la toma de muestras de suelo y su análisis en laboratorio (Corwin y Yemoto, 2017) pero que resulta hoy en día inviable debido a su elevado coste.

La inducción electromagnética (IEM) es una técnica geofísica no invasiva que permite medir simultáneamente la conductividad eléctrica aparente (CEa) en distintos volúmenes de suelo ($\sim m^3$) y a partir de la cual se pueden estimar distintas propiedades químicas y físicas del suelo (Doolittle y Brevik, 2014; Pedrera-Parrilla et al., 2016). Esta técnica permite abarcar en un tiempo reducido grandes superficies (4-5 ha/h) y crear mapas a partir de los datos georreferenciados de CEa. Tradicionalmente se han usado calibraciones específicas para convertir éstos en mapas de propiedades del suelo indicativos de la salinidad (Triantafylis et al., 2000; Nogués et al., 2006; Corwin y Scudero, 2016).

Más recientemente, el desarrollo de códigos de inversión de datos de IEM ha permitido a un abanico más amplio de usuarios estimar la distribución vertical de la conductividad "real" (CE) a partir de la CEa

medida con sensores multiseñal (Binley et al., 2015; Triantafyllis y Monteiro Santos, 2013; McLachlan et al., 2021). Esta técnica permite estimar imágenes bi- y tridimensionales de la CE en el perfil del suelo (Jadoon et al., 2015; Zare et al., 2015; Koganti et al., 2018; Farzadian et al., 2019; Paz et al., 2020). Esta técnica permite por tanto realizar imágenes del subsuelo que reflejan la variabilidad horizontal y vertical de la de salinidad del suelo en una parcela. Para el seguimiento del cultivo se dispone en la actualidad de imágenes del índice de vegetación NDVI (Rouse et al., 1973; Kundu et al., 2018; Neale et al., 2006) proporcionadas por el satélite Sentinel 2, con una resolución espacial de 10 m y temporal de aproximadamente cinco días. Dicha información permite orientar el manejo del cultivo y del agua, así como detectar posibles efectos negativos del manejo implementado y/o del estado hídrico-químico del suelo en el desarrollo del cultivo.

En este trabajo se comparan estas técnicas para las condiciones de los suelos de marisma recuperada en el sector de riego B-XII (Lebrija, Sevilla) y los cultivos más habituales de la zona, con el fin de evaluar la salinidad del suelo en una parcela comercial e identificar zonas problemáticas, posiblemente como resultado de la obstrucción parcial del sistema de drenaje. Los objetivos son (1) evaluar el uso de IEM e inversión para estimar la salinidad/sodicidad del suelo, (2) relacionar los patrones espaciales de la CE y la salinidad del suelo a distintas profundidades con los patrones de NDVI y (3) usar la información proporcionada por estas técnicas para identificar zonas problemáticas en la parcela y hallar el origen de dichos problemas.

2.- Materiales y Métodos

2.1. Descripción de la parcela de estudio

El estudio se ha realizado en una parcela de regadío de 12.5 ha situada en una zona de marisma recuperada (sector de riego B-XII, Fig. 1) en Lebrija (Sevilla). El suelo se caracteriza por su elevado contenido en arcilla (60-70%) y una capa freática salina somera que se

controla mediante un sistema de drenaje instalado a una profundidad de 1 m, con una separación entre drenes de 5 metros. Los drenes tienen una longitud de 250 m y vierten a un canal de drenaje en el borde noreste de la parcela. Tal como se puede apreciar en la Fig. 1, la parcela tiene una ligera pendiente hacia el centro de la misma y el canal de desagüe siendo la máxima diferencia en cota aproximadamente 0.5 m lo que corresponde con una pendiente media de 0.2%. La parcela cuenta con un sistema de irrigación lineal de avance frontal que provoca profundas rodadas cuando el suelo está húmedo. Desde 2014 la parcela ha estado cultivada con alfalfa, algodón, remolacha y tomate (Tabla 1). Entre noviembre de 2014 y octubre de 2018 hubo alfalfa (*Medicago sativa*). Este cultivo suele tener ciclos de vida largos, entre cinco y doce años, llegando a desarrollar un sistema radicular que puede alcanzar los 4.5 metros llegando a ser muy resistente a la sequía (Rasse et al., 2000). Entre abril y septiembre de 2019 se cultivó algodón (Género *Gossypium*). Entre octubre de 2019 y Julio de 2020 se cultivó remolacha (*Beta vulgaris*). En este cultivo se utilizó por última vez el sistema de irrigación anteriormente mencionado. En 2021 se plantó tomate (*Solanum lycopersicum*) temprano en la mitad sur de la parcela y tomate tardío en la mitad norte, ambas con riego por goteo.

Tabla 1. Historial de cultivo de la parcela experimental.

Cultivo	Alfalfa	Algodón	Remolacha	Tomate temprano zona sur	Tomate tardío zona norte
Fecha siembra	06/11/2014	04/04/2019	28/10/2019	01/03/2021	01/04/2021
Fecha cosecha	31/10/2018	18/09/2019	20/07/2020	20/07/2021	05/08/2021

Durante la cosecha del tomate tardío se hundió la cosechadora en ciertas zonas debido a la excesiva humedad del suelo, dejando rodadas de hasta 0.8 m de profundidad. Se georeferenciaron estas zonas usando un sistema de posicionamiento GPS-RTK para su posterior comparación con información espacial sobre las propiedades de suelo y cultivo.

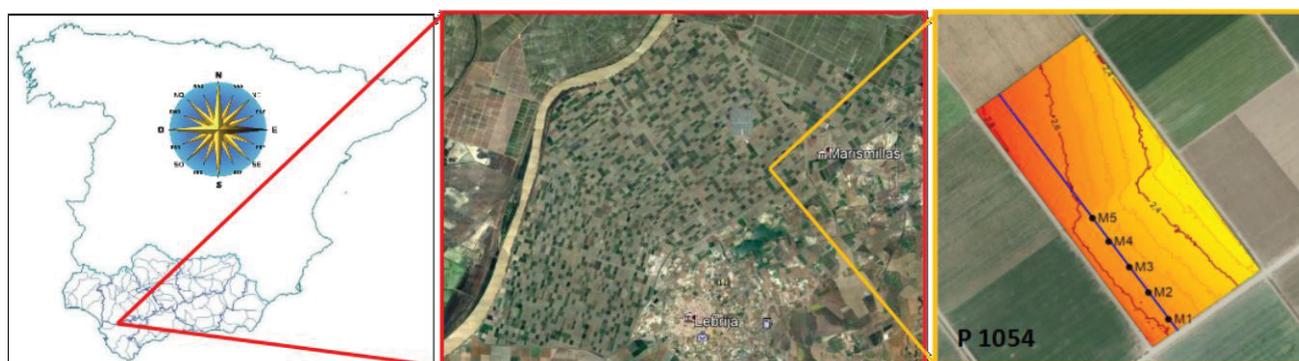


Fig. 1. Localización de la zona de estudio, topografía de la parcela experimental y posición del transecto con los cinco puntos de muestreo (M1-M5).

2.2. Medición de la conductividad eléctrica aparente, posprocesado e inversión

Se midió la conductividad eléctrica aparente (CEa) con un sensor DUALEM-21S (Dualem Inc., Milton, Canadá) el 9 de septiembre 2020. El sensor consta de una bobina que transmite un campo electromagnético a baja frecuencia (9 kHz) y dos pares de bobinas receptoras con orientación horizontal (HCP) y perpendicular (PRP) con respecto al transmisor. La distancia entre la bobina emisora y los dos receptores con orientación perpendicular es de 1.1 y 2.1 m (PRP1 y PRP2), lo que da como resultado profundidades de exploración teóricas de 0.5 y 1.0 m, respectivamente. Las dos bobinas receptoras orientadas horizontalmente están ubicadas a distancias de 1 y 2 m (HCP1 y HCP2) del transmisor y corresponden a profundidades de exploración de 1.5 y 3.0 m, respectivamente. El sensor se aloja en un trineo de PVC que se arrastra con un vehículo todoterreno ATV, equipado con un sistema de posicionamiento GPS-RTK.

La medición se realizó a una velocidad de 5-10 km/h realizando una primera pasada en la dirección perpendicular al sistema de drenaje, con una distancia entre pasadas comprendida entre 5 y 10 m, haciéndose por duplicado las líneas coincidentes con las rodadas del sistema de irrigación de la parcela. La segunda pasada se realizó en paralelo al sistema de drenaje con una distancia entre pasadas comprendida entre 10 y 20 m (Fig. 3).

Posteriormente se eliminaron las mediciones de CEa erróneas y espacialmente inconsistentes y se corrigió el error de posicionamiento de las mediciones brutas de CEa, causado por la latencia o el retardo en la transmisión, recepción o registro de datos durante la medición, usando el método propuesto por González Jiménez et al. (2021). Tras la corrección se interpoló la CEa de cada señal en una malla de 0.5×0.5 m usando el método del inverso de la distancia (Surfer, Golden Software, LLC, Boulder, CO) y se calcularon las estadísticas descriptivas.

Para estimar la distribución vertical de la conductividad eléctrica "real" (CE) se invirtieron las cuatro señales de EMI usando el código EM4Soil (EMTOMO, Lisboa) para producir imágenes bidimensionales de la distribución de CE en una sección del suelo. Dada la elevada CEa que caracteriza la zona de estudio, se usó en este caso el modelo completo, basado en la solución de las ecuaciones de Maxwell, usando el algoritmo S1 que impone un mayor grado suavizado en la estimación del perfil de EC. Se pueden

encontrar más detalles sobre el algoritmo de inversión en Triantafyllis y Monteiro Santos (2013).

Usando el código EM4Soil se realizaron inversiones bidimensionales (a lo largo del transecto) y tridimensionales (para toda la parcela), de las cuales se obtuvieron estimaciones de la CE para las diferentes profundidades de muestreo: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9 m. Los valores de CE se convirtieron posteriormente en conductividad eléctrica de pasta saturada (CEe), razón de adsorción de sodio (RAS) y humedad de suelo (θ) usando ecuaciones de calibración obtenidos a partir de los datos analíticos del suelo y los valores de CE extraídos de la inversión 3D de los datos de CEa.

2.3. Muestreo de suelo, análisis de laboratorio y limpieza drenes

Durante la medición de la CEa se tomaron muestras de suelo en 5 puntos a lo largo de un transecto perpendicular a las tuberías de drenaje (Fig. 1), con incrementos de 0.2 m hasta 1.2 m de profundidad, utilizando una barrena de suelo tipo Edelman de 0.05 m de diámetro. Las 25 muestras de suelo obtenidas se subdividieron, apartándose 50 gramos de cada muestra para determinar la humedad de suelo y el resto se reservó para su posterior análisis en el laboratorio. Las muestras de humedad de suelo se metieron en una estufa con una temperatura constante de 105° C durante 48 horas y con ello se determinó la cantidad de agua en cada muestra. El resto de muestra se secó al aire y se tamizaron usando un tamiz de 2 mm. Se preparó la pasta de suelo saturado acorde con el método estándar de Rhoades (1982), agregando agua desionizada a 200 g de suelo y permitiendo que la muestra alcanzara el equilibrio durante 24 h. Posteriormente, se midió la CEe y la concentración de cationes en el extracto. Se calculó la razón de adsorción de sodio con la ec. (1), utilizando las concentraciones de cationes en meq L^{-1} .

$$\text{RAS} = [\text{Na}^+]/[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{0.5}, \quad (1)$$

El sistema de drenaje fue limpiado con agua a presión el día 20 de enero 2017. La empresa que realizó esta labor proporcionó información sobre la distancia entre la salida del dren y el punto hasta donde se pudo limpiar cada dren. Se georreferenciaron las salidas de los drenes con un sistema de posicionamiento GPS-RTK para poder representar gráficamente la parte limpia de cada dren.

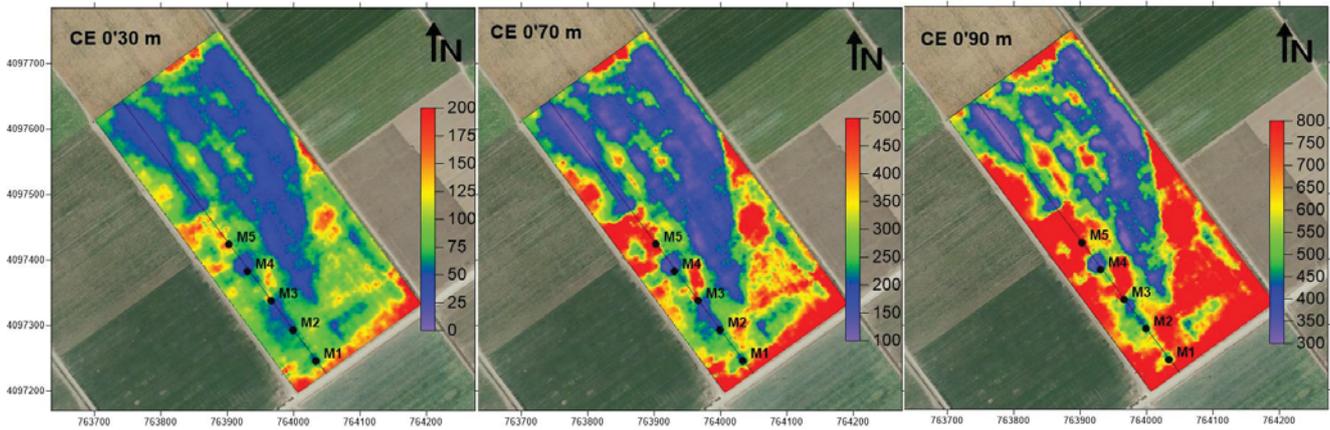


Fig. 2. Mapas de CE para las profundidades de 0.3, 0.7 y 0.9 m obtenidos tras la inversión 3D usando todas las mediciones de CEa. La línea continua representa el transecto con los cinco puntos de muestreo.

2.4. Delimitación de zonas y cálculo del NDVI medio en cada zona

Se delimitaron zonas homogéneas en la parcela mediante una clasificación multivariada con *fuzzy k-means* con componentes principales (Córdoba et al., 2013), implementado en el código FastMapping (Paccioretti et al., 2020), usando los datos de CEa y elevación. Para cada zona se calculó el NDVI medio y la correlación con la CE para las fechas con disponibilidad de imágenes Sentinel 2 con el fin de evaluar posibles efectos de la salinidad en el desarrollo de los cultivos.

Los cálculos se realizaron en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) usando un código desarrollado por Gómez-Giráldez et al. (2019).

3.- Resultados y discusión

3.1. Conductividad eléctrica aparente (CEa)

Las estadísticas descriptivas de la Tabla 2 muestran que la CEa medida para cada señal aumenta con la profundidad de exploración, indicando la presencia de material menos conductivo en superficie que en profundidad, lo que posiblemente se debe a la presencia de la capa freática salina que se sitúa habitualmente a 1 - 1.5 m de profundidad.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de la CEa para cada señal (mS/m).

	PRP1	PRP2	HCP1	HCP2
m*	173.7	372.4	383.8	492.7
min	79.7	208.7	228.5	339.7
max	445.6	792.2	733.2	975.0
med	135.6	379.0	385.5	498.0
s	42.4	67.0	67.4	65.6
CV	0.24	0.18	0.18	0.13
Curt.	3.78	2.61	3.17	2.56
Sesgo	0.69	0.19	0.45	0.22

*m: media; med: mediana; s: desviación típica; CV: coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) muestra que la señal más superficial (PRP1) arroja una mayor variabilidad que el resto de las señales, siendo menor para la señal más

profunda (HCP2), lo que indica que la distribución espacial de la CEa es menos homogénea en superficie que en profundidad posiblemente como consecuencia de la alteración de las características físicas y químicas del suelo superficial generados por la actividad agrícola.

3.2. Estimación de la CE mediante inversión de la CEa

La inversión realizada a lo largo del transecto (2D) resultó en un RMSE de 18.5 mS/m, mientras que la inversión realizada con todos los datos CEa disponibles en la parcela (3D) arrojó un RMSE de 24 mS/m. La primera (2D) se usó para calibrar los datos y extrapolarlos al resto de la parcela (3D).

La Fig. 2 muestra los mapas obtenidos para la inversión 3D a las profundidades de 0.3, 0.7 y 0.9 m. En todos ellos se muestra un patrón similar al obtenido para la CEa, es decir, se aprecia una zona de menor CE en la mitad norte de la parcela donde el incremento de la CE con la profundidad es menos pronunciado que en la mitad sur de la parcela. También se aprecian franjas de menor CE en los tres mapas, con direcciones noroeste-sudeste, coincidentes con las rodadas del sistema de irrigación, posiblemente debido a la mayor compactación y a la consecuente alteración de los flujos de agua y solutos en esta zona, resultando en valores inferiores de la CE con respecto al resto de la parcela.

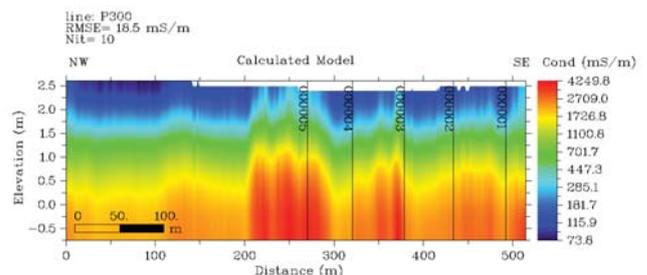


Fig. 3. Inversión de las mediciones de CEa a lo largo del transecto y la localización de los puntos de muestreo.

A lo largo del transecto donde se han tomado las muestras de suelo (Fig. 3), muestra un gradiente

creciente de la CE con la profundidad. Destaca la zona central donde se observa una mayor CE en todo el perfil respecto al resto del transecto. En esta zona se observa una mayor concentración de tubos de drenaje obstruidos (Fig. 8).

Así mismo, coincide con la zona central de la parcela donde el agua superficial tiende a acumularse como consecuencia del nivelado de la parcela (Fig. 1), resultando en mayores valores de CE.

3.3. Relaciones entre la CE y las propiedades del suelo

La comparación entre la CE y las propiedades del suelo, indicativas de salinidad/sodicidad, incluida la humedad del suelo, arroja valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0.82 para la CEe, 0.89 para la RAS y 0.92 para la humedad de suelo (θ). La Fig. 4 muestra las relaciones de la CEe, el RAS y la humedad de suelo con la CE, distinguiéndose entre distintas profundidades de muestreo.

En general se observa que la IEM combinado con inversión muestra un elevado potencial para la estimación de la distribución espacial de la salinidad a distintas profundidades. La humedad del suelo muestra también una elevada correlación con la CE, así como con las propiedades del suelo indicativas para la salinidad. Zonas de mayor salinidad muestran en general una mayor humedad en este tipo de entornos.

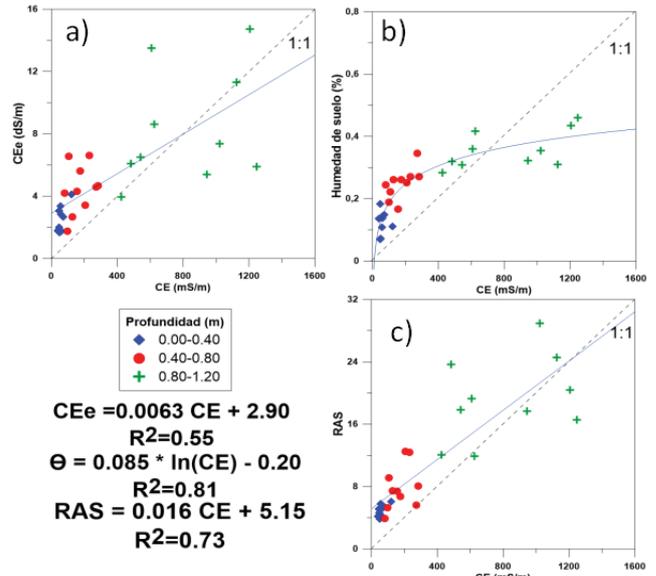


Fig. 4. Relación entre a) CE y CEe, b) CE y θ y c) CE y RAS para las muestras de suelo entre las profundidades 0.0-0.4 (azul), 0.4-0.8 (rojo) y 0.8-1.2m (verde).

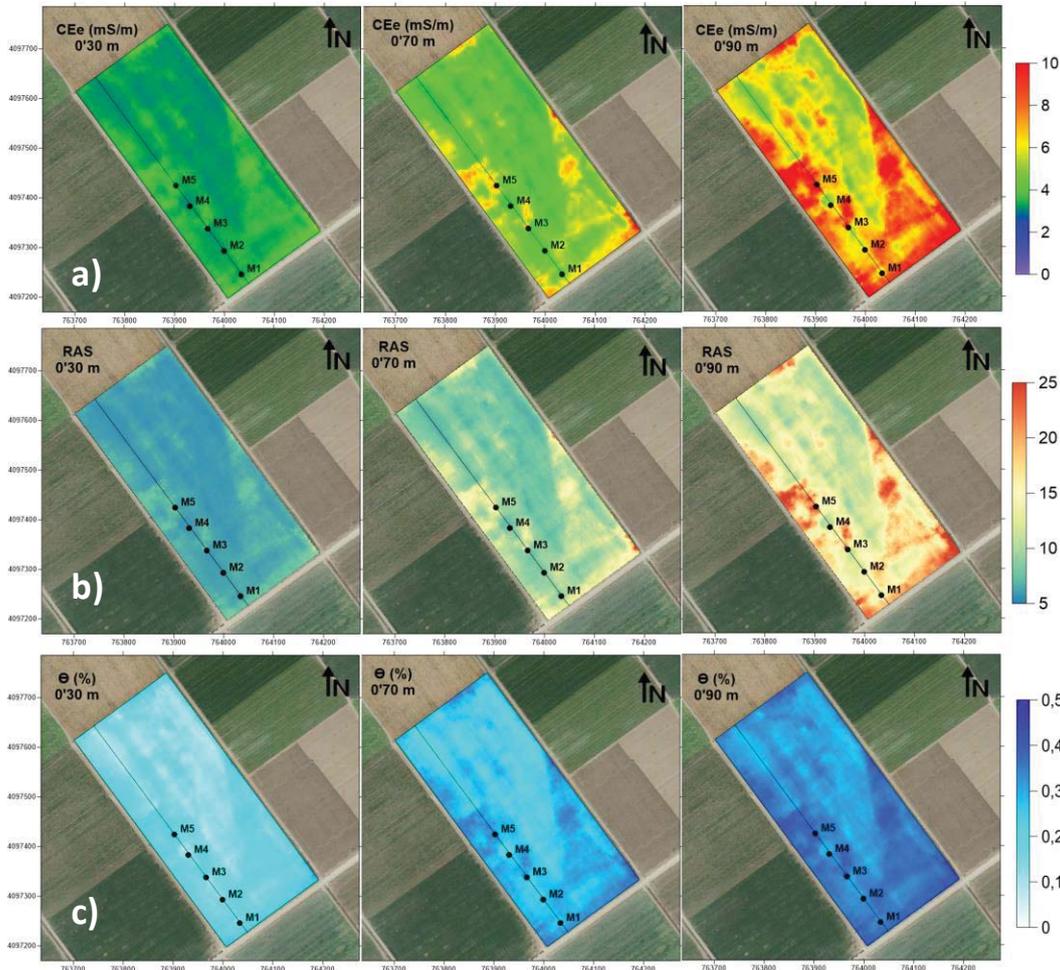


Fig. 5. Mapas obtenidos para a) CEe, b) RAS y c) humedad de suelo obtenidas por su relación con la CE para las profundidades de 0.3, 0.7 y 0.9 metros.

Mediante las relaciones obtenidas entre la CE y las variables analizadas en laboratorio, se han obtenido los mapas de dichas variables (CEe, RAS y humedad de suelo) para las profundidades de 0.3, 0.7 y 0.9 m, tal como se muestra en la Fig. 5.

3.4. Clasificación por zonas y obtención de NDVI

El resultado de la clasificación de la parcela en dos categorías se muestra en la Fig. 6 y la Tabla 3. La zona 1 presenta mayor CEa para las cuatro señales y menor elevación media que la zona 2.

Tabla 3. Estadísticas obtenidas en la clasificación de zonas de nuestra parcela para las variables de entrada.

	m*	sd	CV
Elev. Zona 1	2.48	0.13	0.05
Elev. Zona 2	2.52	0.11	0.04
PRP1 Zona 1	195.48	25.31	0.13
PRP1 Zona 2	129.76	21.35	0.16
PRP2 Zona 1	436.06	42.46	0.10
PRP2 Zona 2	311.16	41.78	0.13
HCP1 Zona 1	428.95	37.26	0.09
HCP1 Zona 2	317.29	.7.23	0.12
HCP1 Zona 1	544.27	37.13	0.07
HCP2 Zona 2	434.48	39.36	0.09

*m: media; sd: desviación típica y CV: coeficiente de variación

La Fig. 7 muestra la evolución del NDVI en las dos zonas, así como la media de la parcela. La zona 1, de elevada CEa, muestra en general valores de NDVI más bajos que en la zona 2, de baja CEa, indicando un peor desarrollo del cultivo en la zona 1 que en la 2. Aunque en general no se perciben efectos adversos de la salinidad en los rendimientos medios por parcela, estos resultados indican que existen diferencias en el desarrollo de los cultivos relacionadas con la salinidad del suelo. También para la fase final del tomate se observan efectos de este tipo. En la zona 1, en la cual se cultivó mayoritariamente tomate temprano, se observan valores de NDVI inferiores

que en la zona 2 que se sitúa principalmente en la mitad norte de la parcela, donde se cultivó tomate tardío. A pesar del menor desarrollo de las plantas en la zona 2, dado que la siembra tuvo lugar un mes después de la siembra del tomate temprano de la mitad sur, se observa que los valores NDVI son superiores en la zona 2.



Fig. 7. Clasificación de la parcela en dos zonas: zona 1 en azul y zona 2 en verde, según la CEa y la topografía de la parcela.

También se puede observar en la Fig. 7 la evolución de la correlación entre la CE, CEe, RAS y humedad de suelo, y el índice NDVI para todo el periodo con disponibilidad de imágenes Sentinel 2. Se ve que periódicamente, cuando el cultivo está en desarrollo durante épocas de verano con mayores necesidades de riego, el patrón espacial de la CE y la salinidad del suelo alcanza la mayor correlación inversa con el NDVI, indicando que durante dichas épocas el crecimiento del cultivo se ve condicionado por la CE. Se observa igualmente que durante épocas de menor demanda evaporativa y/o menores necesidades de riego, cuando el cultivo se está implantando, que las zonas con elevada salinidad (y humedad) tienen un efecto positivo sobre el NDVI y el desarrollo del cultivo. Sin embargo, en la época en la que por las condiciones climáticas y la temperatura incrementan las necesidades de riego, la excesiva humedad

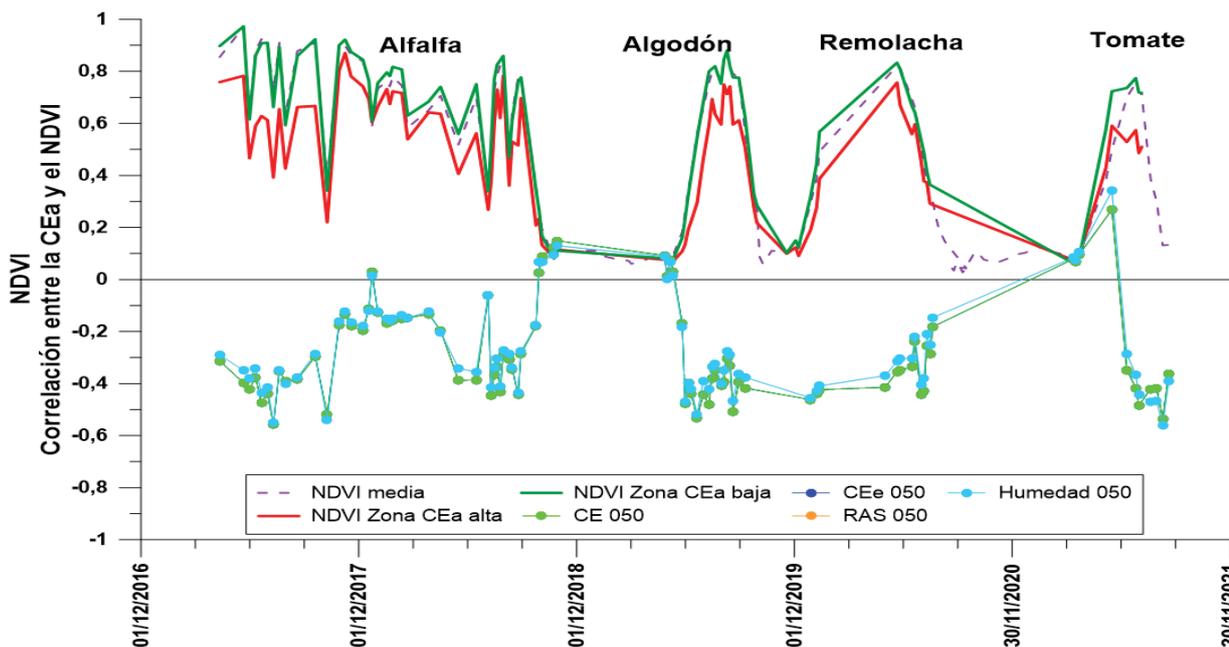


Fig. 6. Evolución del NDVI y la correlación entre el NDVI y las variables calculadas de CE, CEe, RAS y humedad de suelo para la profundidad de 0.5 metros entre 2016 y 2021.

del suelo y las elevadas tasas de evaporación pueden incrementar puntualmente la salinidad en el suelo y provocar elevadas concentraciones de Cl^- y Na^+ en hoja, inhibiendo distintos pasos del metabolismo de N (Ashraf et al., 2018) y manifestándose bajo la forma de clorosis, tal como se ha podido observar en campo.

3.5. Relaciones espaciales entre la salinidad, obstrucciones en el sistema de drenaje y el desarrollo del cultivo

La elevada CE en la parte central de la parcela (Fig. 2) son indicativos de condiciones de mayor humedad/salinidad del suelo, posiblemente como consecuencia de tuberías de drenaje obstruidas en esta zona, a lo que se puede sumar el efecto del flujo superficial de agua hacia esta zona debido a la topografía, incrementando aún más la humedad del suelo y la CEa. La parte central de la parcela se corresponde con parte de la zona 1 en la Fig. 6 donde también el NDVI es de forma persistente inferior al resto de la parcela. Por tanto, las mediciones de la CEa, junto con información proporcionada por sensores remotos muestran potencial para identificar zonas problemáticas donde las características del suelo afectan negativamente al desarrollo de los cultivos.

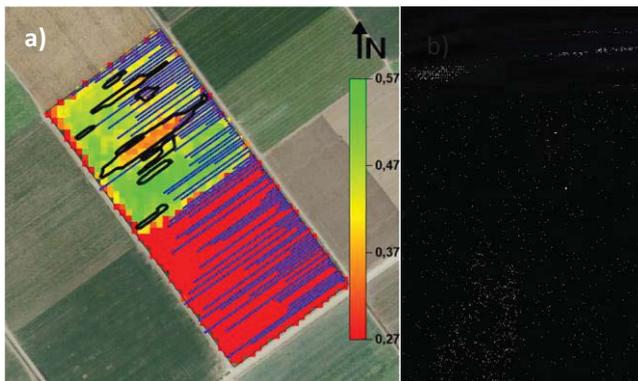


Fig. 8. a) Delimitación de zonas con profundas rodadas tras la cosecha de tomate tardío en agosto como consecuencia de la excesiva humedad de suelo, el sistema de drenaje de la parcela (en azul) sobre un mapa de NDVI del día 30 de Julio de 2021. b) Foto correspondiente a una rodada resultante del atasco de la cosechadora, en la que se observa su profundidad.

En este sentido, cabe destacar también la presencia de zonas excesivamente húmedas de tal forma que dificultaban la recolección del tomate tardío en agosto 2021, al hundirse y atascarse la cosechadora. La Fig. 8 muestra las zonas donde se observaron rodadas profundas como consecuencia de la pasada o los atascos de la cosecha. Se aprecia como dichas zonas coinciden en gran medida con las localizaciones donde el sistema de drenaje está obstruido, coincidiendo parcialmente con zonas de menor NDVI, en este caso debido al color amarillento (clorosis) de las hojas.

4.- Conclusión

El uso de sensores de IEM muestra un elevado potencial para realizar el seguimiento de la salinidad del suelo en los sistemas de marisma recuperada y proporcionar información para informar la toma de decisiones en cuanto al manejo de suelo y agua de precisión en este tipo de entornos. Además, aportan información para identificar zonas con problemas de drenaje relacionados con la obstrucción de tubos de drenaje. Combinando esta información espacial del suelo con imágenes de sensores remotos se puede evaluar el posible impacto de las características del suelo en el desarrollo del cultivo. EMI muestra potencial para orientar el manejo de precisión de suelo y agua en este tipo de entornos. La información expuesta es el resultado de una primera aproximación al problema de la salinidad del suelo en la zona de estudio y tiene por tanto un carácter provisional, teniendo en cuenta el pequeño número de muestras de suelo disponibles para contrastar las estimaciones de CE. Futuros trabajos profundizarán en la mejora de las calibraciones de las imágenes de CE, teniendo en cuenta las variaciones de la textura y la humedad del suelo y en las relaciones observadas entre la CE y el NDVI, explorando su dinámica en el tiempo y su variación espacial a escala de parcela.

Agradecimientos. Este trabajo está financiado por la Agencia Estatal de Investigación de España a través de los proyectos PID2019-104136RR-C21 y PID2019-104136RR-C22, así como el contrato predoctoral PRE2020-095133 y por IFAPA / FEDER a través del proyecto AVA2019.018. Se agradece la colaboración de A.J. Salvatierra y del personal de Las Marismas de Lebrija C.S.A.

5.- Bibliografía

- Ashraf, M., Shahzad, S.M., Imtiaz, M., Rizwan, M.S., 2018. Salinity effects on nitrogen metabolism in plants – focusing on the activities of nitrogen metabolizing enzymes: A review. *J. Plant Nutr.* 41:1065-1081.
- Assouline, S., Russo, D., Silber, A., Or, D., 2015. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. *Water Resour. Res.* 51, 3419–3436.
- Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D., 2015. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resour. Res.*, 51, 3837-3866.
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J.L., Balzarini, M., 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Comput. Electron. Agric.* 97, 6–14.
- Corwin, D.L., Scudiero, E., 2016. Field-Scale Apparent Soil Electrical Conductivity. *Methods Soil Analysis*, Vol 1., SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI
- Corwin, D.L., Yemoto, K., 2017. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. In: *Methods of Soil Analysis*, Vol. 2, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. doi:10.2136/mta2015.0039.
- Doolittle, J.A., Brevik, E.C., 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma.* 223-225, 33-45.
- Farzaman, M., Paz, M.C., Paz, A.M., Castanheira, N.L., Gonçalves, M.C., Monteiro Santos, F.A., Triantafyllis, J., 2019. Mapping soil salinity using electromagnetic conductivity imaging—A comparison of regional and location-specific calibrations. *Land Degrad. Dev.* 30, 3317.
- Gómez-Giráldez P.J., Aguilar C., Caño A.B., García-Moreno A., González-Dugo M.P. 2019. Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators* Volume 106.

- González Jiménez, A., Pachepsky, Y., Gómez Flores, J.L., Ramos Rodríguez, M., Vanderlinden, K., 2021. Correcting position of delayed on-the-go field measurements by optimizing nearest neighbor statistics. In: Samper Calvete et al., Estudios en la Zona no Saturada Vol, XV
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S, Thau D., Moore R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, Remote Sensing of Environment, Volume 202, Pages 18-27.
- Heil, K., Schmidhalter, U., 2012. Characterisation of soil texture variability using apparent electrical conductivity at a highly variable site. *Comput. Geosci.* 39, 98–110.
- Hopmans, J.W. et al., 2021. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Adv. Agron.*, p.191.
- Jadoon, K.Z., Moghadas, D., Jadoon, A., Missimer, T.M., Al-Mashharawi, S.K., McCabe, F.M. 2015. Estimation of soil salinity in a drip irrigation system by using joint inversion of multicoil electromagnetic induction measurements. *Water Resour. Res.* 51, 3490–3504.
- Koganti, T., Narjary, B., Zare, E., Pathan, A.L., Huang, J., Triantafylis, J., 2018. Quantitative mapping of soil salinity using the DUALEM-21S instrument and EM inversion software. *Land Degrad. Dev.* 29, 1768–1781.
- Kuhn et al., 2020. caret: Classification and Regression Training. R package version 6.0-86. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>
- Kundu, A., Denis, D.M., Patel, N.R., & Dutta, D. (2018). A Geo-spatial study for analysing temporal responses of NDVI to rainfall. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 39, 107-116. DOI: 10.1111/sjtg.12217
- McLachlan, P., Blanchy, G., Binley, A., 2021. EMagPy: Open-source standalone software for processing, forward modeling and inversion of electromagnetic induction data. *Comput. Geosci.* 146, 104561.
- Monteiro Santos, F.A., Triantafylis, 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.
- Neale, C.M.U., Mateos L., Gonzalez-Dugo M.P. A real-time crop classification system for evapotranspiration estimates in irrigated areas, Proc. SPIE 6359, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VIII, 63590W (17 October 2006); <https://doi.org/10.1117/12.690043>
- Nogués, J., Robinson, D.A., Herrero, J., 2006. Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 2075–2085.
- Paccioretti P., Córdoba M., Balzarini M., 2020. FastmMapping: Software to create field maps and identify management zones in precision agriculture. *Computers and electronics in Agriculture* 175.
- Paz, A.M., Castanheira, N., Farzamian, M., Paz, M.C., Gonçalves, M. C., Monteiro Santos, F.A., Triantafylis, J., 2020. Prediction of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging. *Geoderma*, 361, 114086.
- Rasse, D.P., Smucker A.J.M., and Santos D. 2000. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 725-731.
- Rhoades, J.D. Soluble salts. In *Methods of Soil Analysis*, 2nd ed.; Page, A.L., Ed.; Agronomy Monograph No 9; American Society of Agronomy, Inc.: Madison, WI, USA, 1982; Part 2; pp. 167–179.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. 3rd *ERST Symposium, NASA*, 1, 309-317.
- Triantafylis, J., Laslett, G.M., McBratney, A.B., 2000. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1009-1017.
- Triantafylis, J., Monteiro Santos, F.A., 2013. Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil) *Geoderma* 28-38
- Triantafylis, J., Terhune IV, C.H., Monteiro Santos, F.A., 2013. An inversion approach to generate electromagnetic conductivity images from signal data. *Environ. Model Softw.* 43, 88–95.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Handbook N° 60, Washington, DC.
- Zare, E., Huang, J., Monteiro Santos, F.M., Triantafylis, J., 2015. Mapping salinity in three dimensions using a DUALEM-421 and electromagnetic inversion software. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 79, 1729-1740.