

# Seguimiento de la salinidad en suelos de marisma recuperada con tomografía de inducción electromagnética e imágenes de NDVI

## Salinity monitoring in reclaimed marsh soils with electromagnetic induction tomography and and NDVI imagery

J.L. Gómez Flores<sup>1</sup>, M. Ramos Rodríguez<sup>1</sup>, A. González Jiménez<sup>1</sup>, M. Farzamian<sup>2</sup>, J.F. Herencia Galán<sup>3</sup>, B. Salvatierra Bellido<sup>4</sup>, P. Cermeño Sacristan<sup>3</sup> & K. Vanderlinden<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>IFAPA Centro Alameda del Obispo, Córdoba, Spain

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Oeiras, Portugal

<sup>3</sup>IFAPA Centro Las Torres, Alcalá del Río (Seville), Spain

<sup>4</sup>FAPA Centro Rancho de la Merced, Jerez de la Frontera, Spain

(\*E-mail: karl.vanderlinden@juntadeandalucia.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.28374>

### RESUMEN

La interacción entre la capa freática salina y somera y la agricultura intensiva da lugar a un frágil equilibrio entre la acumulación y lixiviación de sales en los suelos de marisma recuperada del sector de riego B-XII, en el suroeste de España. Evaluamos el potencial de la tomografía de inducción electromagnética (EMI) e imágenes de NDVI de Sentinel 2 para el seguimiento de la salinidad del suelo a escala de parcela en esta zona, usando mediciones de la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo realizadas en 2017 y 2020. Las estimaciones de la conductividad eléctrica (EC) obtenidas mediante inversión de la ECa mostraron una fuerte correlación ( $R \approx 0,90$ ) con la conductividad del extracto de pasta saturada (ECe) y la relación de absorción de sodio (SAR), lo que dio lugar a ecuaciones de calibración lineales con  $R^2 \approx 0,80$  para ambos años y resultados de validación cruzada de exclusión (LOOCV) fiables para los horizontes subsuperficiales de  $0,55 < R^2 < 0,81$ . El patrón espacial de EC mostró correlación inversa con el del NDVI para tomate para industria, algodón y remolacha cultivados entre los años 2017 y 2019, alcanzando valores R de -0,64, -0,87 y -0,73, respectivamente.

**Palabras clave:** conductividad eléctrica aparente, distrito de riego B-XII, NDVI, salinidad, suelos de marisma recuperada.

### ABSTRACT

The presence of a shallow saline water table in combination with intensive agriculture in the reclaimed marshes of the B-XII irrigation district, in SW Spain, may disrupt the fragile balance between salt accumulation and leaching in the root zone. We evaluate the potential of electromagnetic induction tomography (EMI) and the use of Sentinel 2 NDVI imagery for field-scale soil salinity monitoring using soil apparent electrical conductivity (ECa) measured in 2017 and 2020. Depth-specific electrical conductivity (EC), obtained from the inversion of ECa, showed a strong correlation ( $R \approx 0.90$ ) with laboratory-analysed saturated paste extract conductivity (ECe) and sodium adsorption ratio (SAR), resulting in linear calibration equations with  $R^2 \approx 0.80$  for both years and reliable cross-validation of exclusion (LOOCV) results for the subsoil ( $0.55 < R^2 < 0.81$ ). The spatial pattern of EC showed inverse correlation with NDVI for processing tomato, cotton and sugar beet, cropped between 2017 and 2019, reaching R values of -0.64, -0.87 and -0.73, respectively.

**Keywords:** apparent electric conductivity, B-XII irrigation district, NDVI, soil salinity, reclaimed marsh soils.

## INTRODUCCIÓN

El frágil equilibrio entre las tasas de acumulación y eliminación de sales en el perfil del suelo en regiones agrícolas de origen salino, supone un riesgo de resalinización que demanda herramientas eficientes para el seguimiento y evaluación del estado de la salinidad del suelo.

La técnica de la inducción electromagnética (EMI) permite caracterizar la variabilidad espacial del suelo y sus propiedades a escala de parcela (Doolittle & Brevik, 2014) midiendo simultáneamente la conductividad eléctrica aparente integrada (ECa) a distintas profundidades de exploración. Sin embargo, para obtener información sobre la distribución vertical de la conductividad eléctrica en el suelo (EC) es necesario recurrir a la inversión conjunta de la ECa (Triantafylis & Monteiro Santos, 2013).

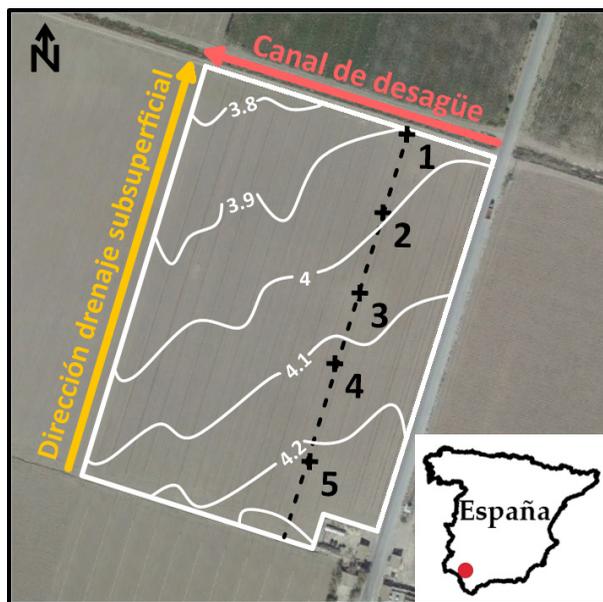
La mayoría de los estudios muestran relaciones positivas entre el NDVI y la ECa, pero en el caso de suelo salinos, y si la ECa está estrechamente correlacionada con la salinidad, se pueden esperar relaciones inversas.

En este trabajo evaluamos (1) el potencial de la tomografía EMI para proporcionar ecuaciones de calibración robustas que permitan estimar la conductividad en extracto de pasta saturada (ECe) y la relación de absorción de sodio (SAR) a partir de EC, usando datos mínimos de análisis de suelo, y (2) el potencial de las imágenes NDVI de Sentinel 2 para el seguimiento y la evaluación de la salinidad del suelo en el sector de riego B-XII (suroeste de España).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se desarrolló en una parcela agrícola de 4 ha del sector B-XII (Lebrija, España, Figura 1) con un suelo arcilloso y una capa freática salina y somera, drenada artificialmente a 1 m de profundidad.

Se realizaron mediciones de ECa en noviembre de 2017 y febrero de 2020 con profundidades de exploración teóricas cercanas a 0,5, 1, 1,5 y 3 m, usando un sensor DualEM-21S alojado en un trineo de PVC y remolcado por un vehículo todo terreno



**Figura 1** - Parcela de estudio con topografía y localización de los cinco puntos de muestreo a lo largo del transecto.

(ATV). Las mediciones de ECa georreferenciadas se interpolaron en una cuadrícula de 0,5 x 0,5 m utilizando el método de inverso de la distancia implementado en Surfer (Golden Software, LLC Boulder, CO) y se invirtieron utilizando el software EM4Soil (EMTOMO, Lisboa) para estimar EC a las profundidades: 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 y 0,9 m.

Simultáneamente a las mediciones de ECa, se tomaron muestras de suelo en 5 puntos y a 5 profundidades en intervalos de 0,2 m. Se midió EC, pH, [Na<sup>+</sup>], [K<sup>+</sup>], [Mg<sup>2+</sup>], y [Ca<sup>2+</sup>] en la pasta saturada del suelo y el SAR se calculó como:

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

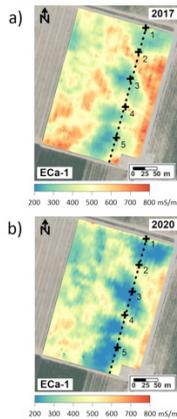
con las concentraciones de cationes en meq/L.

La inversión 2D de ECa en 2017 y 2020 se realizó a lo largo del transecto donde se seleccionaron los 5 puntos de muestreo (Figura 1). Los valores de EC se calibraron con los datos de ECe y SAR de las muestras de suelo y se validaron mediante validación cruzada de exclusión. La inversión 3D se realizó usando todos los datos de ECa disponibles en la parcela para producir mapas de ECe y SAR a distintas profundidades usando la calibración obtenida con la inversión 2D.

Se analizaron, con Google Earth Engine, 36 imágenes NDVI (Sentinel 2) con una resolución espacial de 10 m, correspondientes a los periodos de cultivo entre 2017 y 2019: tomate, algodón y remolacha azucarera, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial de ECa para la profundidad de exploración teórica de 1m (ECa-1) fue similar en 2017 (Figura 2a) y en 2020 (Figura 2b). Los valores de EC fueron mayores en el perfil de 2017 y mostraron para ambos años que el patrón espacial de la EC en el suelo superficial se origina en el patrón subsuperficial de EC.



**Figura 2** - Distribución espacial de ECa-1 e inversión en el transecto para (a) 2017, (b) 2020.

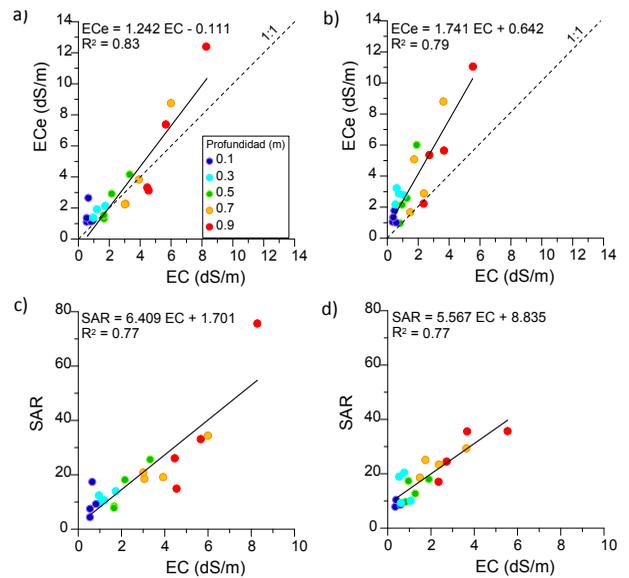
Se observó una mayor correlación entre EC y ECe,  $[Na^+]$  y SAR en 2017 que en 2020 (Tabla 1). La correlación incrementó con la profundidad para ambos años mientras que el horizonte superficial mostró una falta de correlación.

Se describieron las relaciones EC-ECe y EC-SAR con modelos lineales de calibración de  $0,77 < R^2 < 0,83$  (Fig. 3).

Los resultados de la validación cruzada mostraron que las estimaciones de ECe y SAR solo fueron fiables en los horizontes subsuperficiales (0,5-0,9 m) (Tabla 2).

**Tabla 1** - Coeficiente de correlación de Pearson (R) entre ECe y EC-SAR a distintas profundidades para 2017 y 2020

R	Mean	Depth (m)					
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	
2017	ECe	0.91	0.05	0.91	0.96	0.99	0.98
	SAR	0.88	0.33	0.72	0.96	0.93	0.97
2020	ECe	0.89	0.12	0.27	0.92	0.73	0.91
	SAR	0.88	0.04	-0.22	0.55	0.81	0.94



**Figura 3** - Relaciones EC-ECe para a) 2017 y b) 2020 y EC-SAR para c) 2017 y d) 2020.

**Tabla 2** - Resultados de la validación cruzada para Ece y SAR.

EC	RMSE	ECe		SAR			
		MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	
2017	Sup.	0.61	0.47	0.21	4.33	3.03	0.02
	Subsup.	1.4	1.23	0.81	11.6	8.26	0.55
2020	Sup.	0.86	0.7	0.21	7.16	5.75	0.07
	Subsup.	1.59	1.35	0.71	4.78	3.89	0.67

Los mapas de ECe y SAR para horizontes subsuperficiales (Figura 4) indicaron que ECe aumentó en 2020 respecto a 2017, mientras que SAR disminuyó, sugiriendo una mayor concentración de cationes, pero con menor influencia de  $[Na^+]$  en 2020 que en 2017.

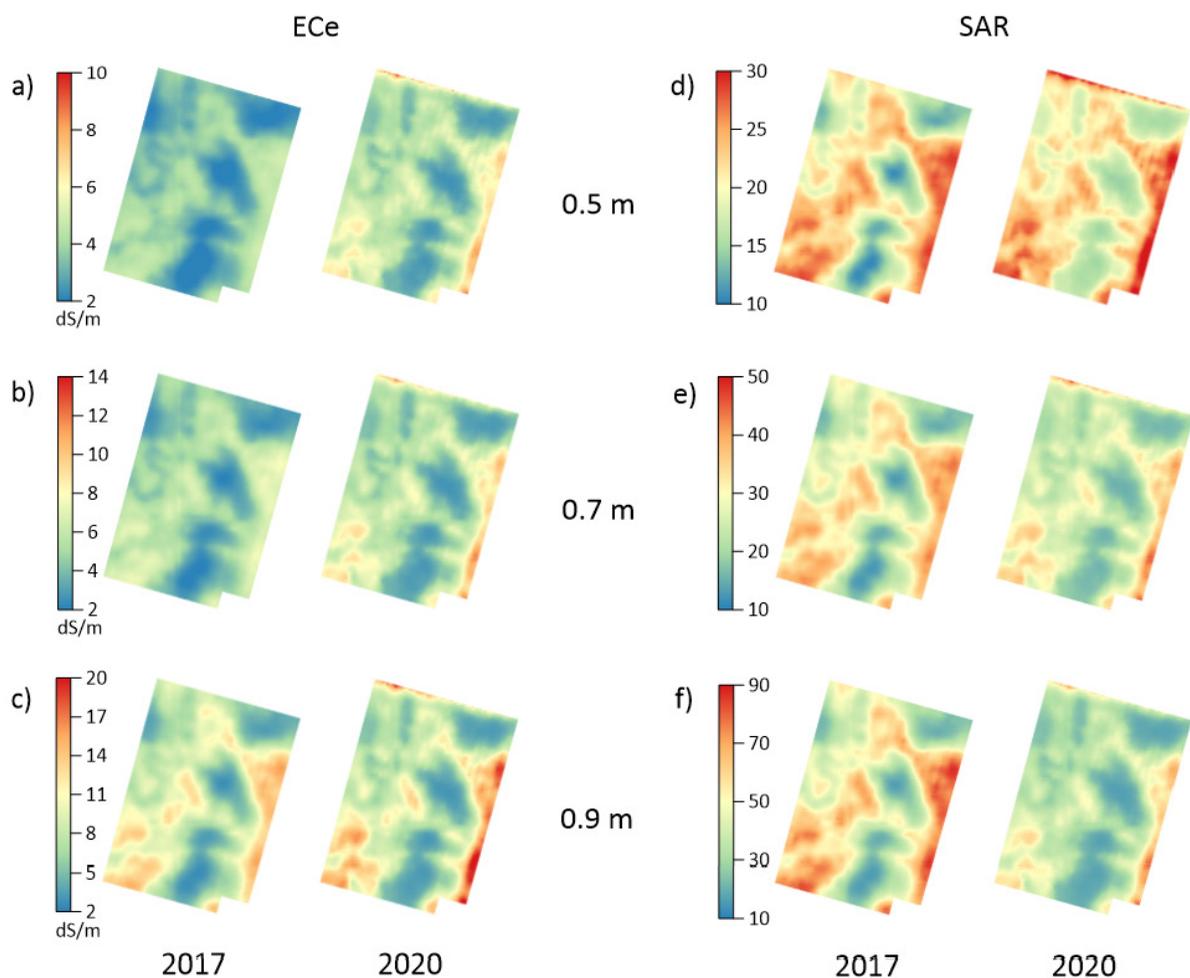


Figura 4 - ECE (a-c), y SAR (d-f) para 2017 y 2020 a 0,5, 0,7 y 0,9 m de profundidad.

El NDVI mostró correlaciones negativas con EC, siendo similares en profundidad y para ambas mediciones con  $R = -0,64$ ,  $-0,87$  y  $-0,73$  para tomate, algodón y remolacha azucarera, respectivamente, para la imagen de mayor NDVI (Figura 5).

El NDVI fue, en general, más bajo en zonas de mayor ECE, reflejando un retardo en el desarrollo de los cultivos (Figura 6). No obstante, la remolacha azucarera mostró menor sensibilidad en este aspecto (Figura 6c) al finalizar su ciclo vegetativo al inicio del estiaje.

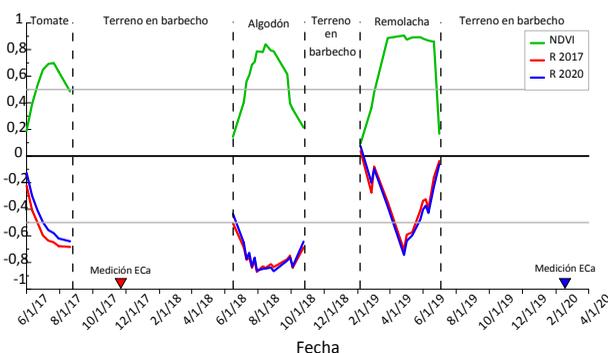
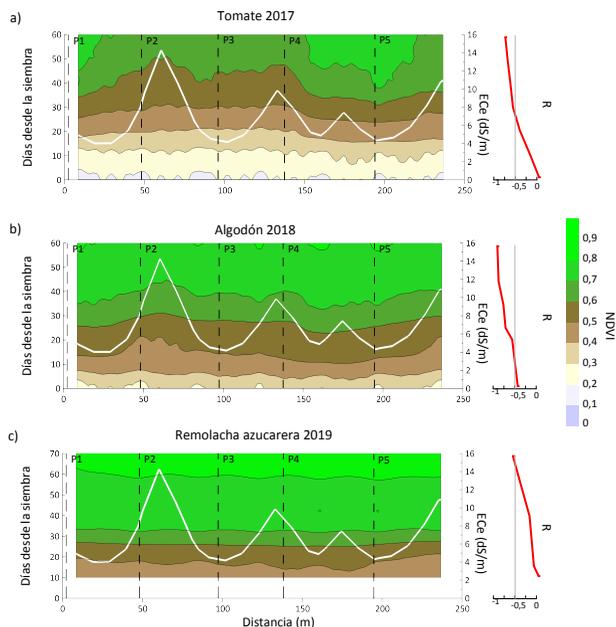


Figura 5 - Evolución del NDVI medio y coeficiente de correlación de Pearson (R) entre la ECE a 0,9 m y el NDVI, en la parcela.



**Figura 6** - Evolución del NDVI a lo largo del transecto para a) tomate, b) algodón y c) remolacha azucarera desde el día de emergencia/trasplante hasta el día de máximo NDVI. Las líneas blancas y rojas representan la ECe estimada a 0,9 m de profundidad en 2017 y la evolución de su correlación con el NDVI, respectivamente.

Al margen de las distintas respuestas fisiológicas de los cultivos a la salinidad (Minhas *et al.*, 2020), una explicación plausible para estos resultados es que la remolacha azucarera es un cultivo de primavera que no requiere de los grandes aportes de

agua de riego de la época estival, como sí ocurre con los cultivos de tomate y algodón. En éstos se favorece el ascenso de la capa freática salina hacia la zona radicular durante el periodo con mayores tasas de evaporación.

## CONCLUSIONES

La tomografía EMI e inversión permitió obtener modelos lineales de calibración ( $R^2 \approx 0,80$ ) para la estimación de ECe y SAR a partir de EC en suelos de marisma recuperada del sector B-XII, sin necesidad de considerar más de cinco puntos de muestreo. No obstante, las estimaciones solo son fiables en la zona subsuperficial del perfil (0,5-0,9 m).

Las fuertes correlaciones inversas ( $-0,87 < R < -0,64$ ) entre EC y NDVI de los cultivos considerados demuestran el potencial del uso combinado de la tomografía EMI e imágenes NDVI para el seguimiento y la evaluación de la salinidad a escala de parcela en el sector B-XII. La afección de la salinidad a los cultivos de la zona continua presente actualmente.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por la Agencia Estatal de Investigación de España mediante ayudas: PID2019-104136RRC21, PID2019-104136RR-C22, beca de doctorado PRE2020-095133; y ayuda AVA2019.018 por IFAPA/FEDER.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Doolittle, J.A. & Brevik, E.C. (2014) - The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, vol. 223-225, p. 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>
- Minhas, P.S.; Ramos, T.B.; Ben-Gal, A. & Pereira, L.S. (2020) - Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, vol. 227, art. 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>
- Triantafylis, J. & Monteiro Santos, F.A. (2013) - Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil). *Geoderma*, vol. 211-212, p. 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.001>