

Evaluación de la salinidad del suelo con la conductividad eléctrica y el NDVI en el sector B-XII, Lebrija (Sevilla)

Assessing soil salinity with electrical conductivity and NDVI in the B-XII irrigation district, Lebrija (Sevilla)

Mario Ramos^{1,*}, Mohammad Farzamian², José Luis Gómez¹, Alfonso González³, Benito Salvatierra⁴, Gonzalo Martínez⁵ & Karl 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

(*E-mail: mario.ramos.r@juntadeandalucia.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.28377>

RESUMEN

Se propone una metodología para estimar la salinidad del suelo y su relación con el NDVI a escala de parcela. Se midió la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) con un sensor de inducción electromagnética (IEM) en una parcela del sector B-XII, Lebrija (Sevilla) y se obtuvieron imágenes bi- y tridimensionales de la conductividad eléctrica (CE) mediante inversión. La CE mostró buenas relaciones con los indicadores de salinidad del suelo ($R^2 > 70\%$), lo que permitió la estimación de dichos indicadores a partir de las imágenes de CE. Se evalúa la metodología y los resultados que arroja usando series históricas de 7 años de imágenes de NDVI y realizando de esta forma un seguimiento del efecto de la salinidad del suelo sobre el desarrollo de los cultivos. La identificación de zonas de salinización puntual con efectos negativos sobre el desarrollo de los cultivos permite apoyar la toma de decisiones en cuanto al manejo de suelo, agua y cultivo.

Palabras clave: conductividad eléctrica, humedad de suelo, salinidad, índices de cultivo, teledetección.

ABSTRACT

A method is proposed to estimate soil salinity and its relationship with NDVI at the plot scale. Soil apparent electrical conductivity (ECa) was measured with an electromagnetic induction sensor (EMI) at a commercial plot in the B-XII irrigation district, Lebrija (Seville). Bi- and three-dimensional images of soil electrical conductivity (EC) were obtained using inversion. Estimated EC showed strong relationships with soil salinity indicators ($R^2 > 70\%$), allowing the estimation of these indicators from the EC images. The methodology and the obtained results were evaluated using historical NDVI imagery obtained during 7 cropping seasons and allowed us to monitor the effect of soil salinity on crop development. The identification of areas where sudden soil salinization occurs, with negative effects on crop development, is relevant for informing soil, water and the crop management decision-making

Keywords: electrical conductivity, soil moisture, salinity, spectral response of crops, remote sensing.

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, por lo que se requiere un seguimiento de las características del suelo para detectar el posible deterioro de su calidad. La inducción electromagnética (IEM) es una técnica geofísica que permite medir la conductividad eléctrica aparente (CEa) en distintos volúmenes de suelo ($\sim m^3$) de forma no invasiva, para estimar propiedades químico-físicas del suelo (Doolittle and Brevik, 2014) y puede usarse por tanto para tal fin. Tradicionalmente se han empleado calibraciones específicas para convertir estos mapas de CEa en mapas de propiedades del suelo indicativos de la salinidad/sodicidad (Corwin y Scudiero, 2016). El desarrollo de códigos de inversión de datos de IEM ha permitido estimar la distribución vertical de la conductividad "real" (CE) a partir de la CEa medida con sensores multiseñal (Triantafilis y Monteiro Santos, 2013), estimando imágenes bidimensionales de la CE en el perfil del suelo (Farzamian *et al.*, 2019). Para el seguimiento del cultivo a escala de parcela se utiliza el índice NDVI obtenido de la plataforma Sentinel 2 (Huang *et al.*, 2021). Dicha información permite orientar el manejo del cultivo y del agua, así como evaluar posibles efectos negativos en el desarrollo del cultivo como consecuencia del manejo implementado y/o del estado hídrico-químico del suelo. Los objetivos son (1) evaluar el uso de IEM e inversión para estimar la salinidad/sodicidad del suelo de marisma recuperada en el sector de riego B-XII (Lebrija, Sevilla), (2) relacionar los patrones espaciales de la CE 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se ha realizado en una parcela de regadío (12,5 ha) situada en una zona de marisma recuperada (sector de riego B-XII) en Lebrija (Sevilla) (Figura 1), con un elevado contenido en arcilla (60-70%) y una capa freática salina somera que se controla mediante un sistema de drenaje



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

instalado a una profundidad de 1 metro. Se midió la 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 que proporcionan profundidades de exploración teóricas de 0,5, 1,0, 1,5 y 3,0 m. 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. Se interpoló la CEa de cada señal en una malla de 0,5 x 0,5 m usando el método del inverso de la distancia (Surfer, Golden Software, LLC, Boulder, CO) y se calcularon las estadísticas descriptivas. Se invirtieron las cuatro señales de CEa usando el código EM4Soil (EMTOMO, Lisboa), propuesto por Triantafilis y Monteiro Santos (2013), para estimar la distribución vertical de la conductividad eléctrica "real" (CE). Los valores de CE se convirtieron posteriormente en humedad de suelo (θ), en conductividad eléctrica (CEe) y concentración de Sodio (Nae), usando ecuaciones de calibración obtenidas a partir de los datos analíticos del suelo y los valores de CE extraídos de la inversión 3D. Se calculó el NDVI de la parcela y la correlación con el mapa de 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). 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 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 separaron en dos sub-muestras, una para las analíticas y otra para determinar la humedad gravimétrica, secando las muestras a 105°C durante 48 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La CE incrementaba con la profundidad, 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 a 1 - 1,5 m de profundidad.

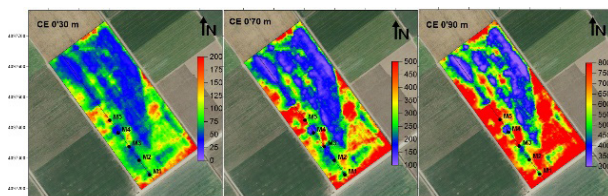


Figura 2 - Mapas de conductividad eléctrica (CE) para las profundidades de 0,3, 0,7 y 0,9 metros obtenidos tras la inversión 3D usando todas las mediciones de CEa y situación de los puntos de muestreo.

El coeficiente de variación muestra que la distribución espacial de la CEa es menos homogénea en superficie que en profundidad, posiblemente como consecuencia de la alteración de las características físico-químicas del suelo superficial generados por la actividad agrícola. La inversión 3D realizada resultó en un RMSE de 24 mS/m. Los modelos usados para describir las relaciones CE-CEe, CE-Nae y CE- θ mostraron valores del coeficiente de determinación (R^2) entre 0,77 y 0,82 (Fig. 3). Se observa que la CEe y el Nae tienen una relación lineal con la CE, mientras la humedad tiene una relación logarítmica.

Dichas variables posteriormente han sido convertidas en los mapas resultantes que se muestran en

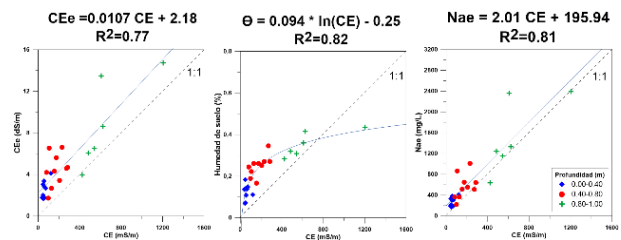


Figura 3 - Relación entre la CE y CEe, CE y humedad de suelo, y CE y Nae para las muestras de suelo entre las profundidades 0-0,4 (azul), 0,4-0,8 (rojo) y 0,8-1,0 metros (verde).

la Figura 4. Se observa que zonas de mayor salinidad muestran en general una mayor humedad en este tipo de entornos. La relación entre el NDVI y la CE (para la profundidad de 0,3 metros) en todo el periodo con disponibilidad de imágenes Sentinel 2 (Figura 5) muestra que hay determinadas épocas en las que esta relación crece (de forma positiva o negativa). Durante épocas de menor demanda evaporativa, se favorece el crecimiento del cultivo por la presencia de las zonas de alta CE. Sin embargo, cuando nos encontramos en épocas de alta demanda evaporativa, la humedad 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) manifestándose bajo

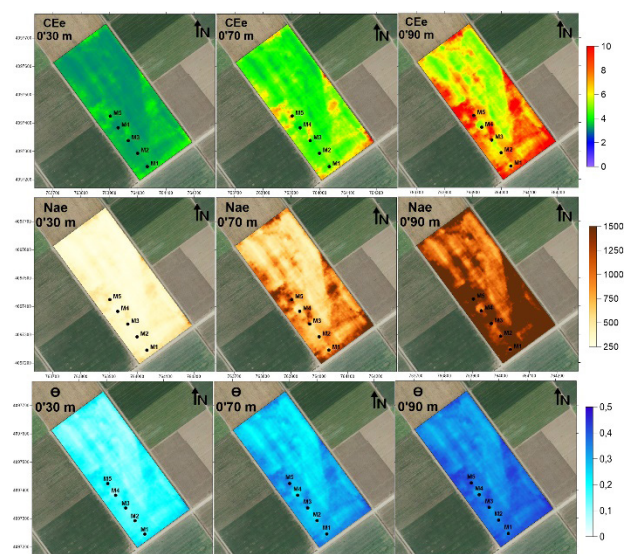


Figura 4 - Mapas de CEe, Nae y humedad de suelo obtenidos a partir de las estimaciones de CE para las profundidades de 0,3, 0,7 y 0,9 metros.

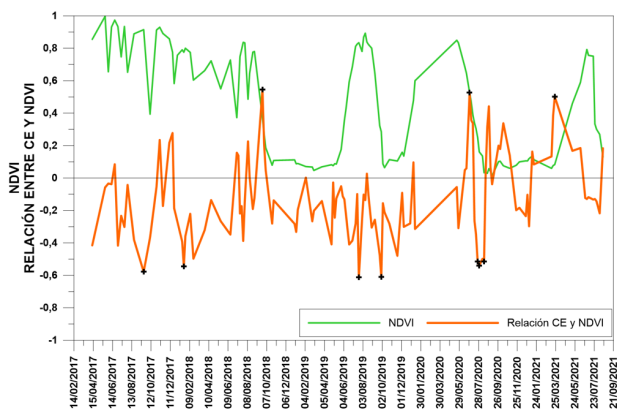


Figura 5 - Evolución del NDVI y la correlación entre el NDVI y la CE a 0,3 metros desde 2017 hasta 2021.

la forma de clorosis, como se ha podido observar en campo. Se observa que en determinadas fechas (marcadas por cruces negras en la Figura 5) que la correlación entre CE y NDVI alcanza valores inferiores a -0.5 que corresponden en su mayoría con el estiaje, cuando la salinidad afecta negativamente al desarrollo del cultivo.

Sin embargo, al finalizar el ciclo de cultivo y al comienzo del cultivo de 2021 se observa en ocasiones lo contrario, con correlaciones superiores a 0.5, posiblemente como resultado de la mayor humedad del suelo que beneficia el desarrollo del cultivo.

CONCLUSIONES

El uso de sensores de IEM muestra un elevado potencial para realizar el seguimiento de la salinidad/sodicidad en los sistemas de marisma recuperada y proporcionan información para apoyar la toma de decisiones en el manejo de suelo y agua de precisión en este tipo de entornos. Su combinación con imágenes de sensores remotos puede evaluar el posible impacto de las características del suelo en el desarrollo del cultivo. Futuros trabajos profundizarán en la mejora de las calibraciones teniendo en cuenta las variaciones de la textura y la humedad del suelo, explorando su dinámica espacio-temporal a escala de parcela.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por la Agencia Estatal de Investigación de España a través de los proyectos PID2019-104136RRC21 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.

REFERENCIAS

- 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. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 41, n. 8, p. 1065-1081. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431670>
- 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>
- Corwin, D.L. & Scudiero, E. (2016) - Field-Scale Apparent Soil Electrical Conductivity. *Methods Soil Analysis*, Vol 1., SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Farzamian, 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 Degradation & Development*, vol. 30, n. 12, p. 1393-1406. <https://doi.org/10.1002/ldr.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*, vol. 106, art. 105526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526>
- 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*, vol. 202, p. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Huang, S.; Tang, L.; Hupy, J.P.; Wang, Y. & Shao, G. (2021) - A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, vol. 32, p. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Triantafyllis, 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>