

Validación de índices espectrales para detectar salinidad edáfica en cebada mediante sensores electromagnéticos terrestres

E. Amezketa¹, V. Urdánoz¹, I. Barinagarrementeria¹, L. Albizua¹, Y. Berkane², C. Portero² y M.A. Casterad²

¹ TRACASA. C/ Cabárceno, 6. 31621 Sarriguren (Navarra, España), amezketa@tracasa.es

² Unidad de Suelos y Riegos (asociada a EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda. Montañana, 930. 50059 (Zaragoza, España), acasterad@aragon.es

RESUMEN

La salinidad edáfica es un grave problema que reduce la calidad de los suelos y la producción agrícola. Para identificar áreas salinas a gran escala, la teledetección puede ser una herramienta prometedora aunque requiere calibración y validación. Este trabajo explora las posibilidades de varios índices espectrales derivados de imágenes Landsat 5 y 7 para identificar áreas salinas en parcelas con cebada. Su validación se realiza con cartografía de salinidad (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, CEe) utilizada como verdad terreno, obtenida a partir de sensores electromagnéticos móviles georreferenciados (SEMG). Para ello, se pone a punto una metodología para comparar en cada parcela los índices espectrales con la CEe. Se han encontrado correlaciones significativas y negativas entre la CEe y los índices NDVI, EVI y ASTER, y correlaciones significativas y positivas entre CEe y SI. Se ha seleccionado el NDVI como índice más apropiado para caracterizar la salinidad en parcelas de cebada, ya que, además de ser uno de los que más y mejor correlacionan con la CEe, tiene fácil interpretación y es el más utilizado en bibliografía.

Palabras clave: salinidad del suelo, CEe, Landsat, índices espectrales, NDVI, EVI, ASTER, SI.

ABSTRACT

Soil salinity is a severe problem reducing soil quality and agricultural production. Remote sensing has been shown as a promising tool for identifying soil salinity at big scales, even though it requires calibration and validation. This work explores the possibilities of several spectral indices derived from Landsat 5 and 7 images for identifying salt-affected areas in barley fields. Their validation is made with soil salinity mapping (mapping of electrical conductivity of the soil saturation extract, ECE), used as ground truth, and obtained with mobile and georeferenced electromagnetic sensors. For that, a methodology is set up to compare, at each parcel, the spectral indices with ECE. Significant and negative correlations have been found between soil salinity (ECE) and NDVI, EVI and ASTER indices, and significant and positive correlations between ECE and SI. NDVI has been selected as the most appropriate index for characterizing soil salinity in barley fields, because, besides being one of the most and best correlated with ECE, it is easy to interpret and is the most used in the literature.

Keywords: soil salinity, ECE, remote sensing, Landsat, spectral indices, NDVI, EVI, ASTER, SI.

INTRODUCCIÓN

La salinidad/salinización edáfica es uno de los procesos degradadores del suelo que conlleva pérdida en la producción agrícola y reducción en la gama de cultivos viables. Su control pasa por la identificación de las áreas afectadas y las vulnerables. Este tipo de inventario, para grandes superficies, requiere tecnologías y metodologías efectivas y abordables. La teledetección se presenta como una herramienta prometedora, aunque requiere calibración y validación. Los sensores electromagnéticos terrestres en combi-

nación con muestreo y análisis de suelos permiten obtener la “verdad-terreno” necesaria para su validación.

En este trabajo se exploran las posibilidades de varios índices espectrales derivados de imágenes Landsat 5 y 7 para identificar áreas salinas en parcelas cultivadas con cebada y se utilizan sensores electromagnéticos móviles georreferenciados (SEMG) para su validación. Los objetivos específicos son (1) presentar una metodología para obtener mediante el SEMG

cartografía (verdad terreno) de salinidad edáfica (CEe) combinable con información de Landsat, (2) establecer las relaciones entre índices derivados de imágenes Landsat y la salinidad (CEe) y seleccionar el más apropiado, y (3) establecer fechas óptimas para la detección y seguimiento con imágenes de satélite de la salinidad edáfica en parcelas de cebada.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

El trabajo se ha desarrollado en 9 parcelas de cebada con superficies de 4,6 a 45,3 ha y con distinto grado de afección por salinidad, desde parcelas no salinas ($CEe < 4 \text{ dS m}^{-1}$) a parcelas con superficie fuertemente salina ($CEe \geq 16 \text{ dS m}^{-1}$). Cinco parcelas están en secanos de Navarra (SEC-1 a 5) y cuatro en regadíos de Aragón (Huesca; REG-1 a 4).

Índices espectrales

Los 4 índices espectrales analizados para detectar salinidad en cebada (Tabla 1) se han calculado para una serie de imágenes Landsat 5 y 7 (escenas 200/30 y 200/31 para Navarra y 199/031 para Aragón), una vez corregidas geométrica y radiométricamente y remuestreadas a píxel de $25\text{m} \times 25\text{m}$. Dichas imágenes recogen la variabilidad fenológica de la cebada al corresponder al periodo enero-julio 2009: 21 de enero, 25 de marzo, 18 de abril (la parcela SEC-5 no tiene información para esta fecha), 28 de mayo, 13 y 29 de junio para Navarra; y 14 de febrero, 18 de marzo, 19 de abril, 5 de mayo, 22 de junio y 24 de julio para Aragón.

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \text{ Rouse et al., 1974}$$

$$SI = \sqrt{(TM2^2 + TM3^2)} \text{ Douaoui et al., 2006}$$

$$ASTER = \frac{TM5 - TM7}{TM5 + TM7} \text{ Al-Khaier, 2003}$$

$$EVI = \frac{2.5 \times (TM4 - TM3)}{TM4 + 6 \times TM3 - 7.5 \times TM1 + 1} \text{ Huete et al. 1999}$$

Tabla 1: Formulación y referencia bibliográfica de los índices espectrales estudiados.

Mapas de salinidad (CEe)

Se han elaborado mapas de salinidad (CEe, dS m^{-1}) de las parcelas utilizando el SEMG según Amezketta et al. (2007), con marcos de lecturas de $15\text{-}20\text{m} \times 2\text{-}10\text{m}$. La bobina transmisora del

SEMG genera un campo magnético primario, que en función de la capacidad conductora del suelo induce un campo magnético secundario que es detectado por la bobina receptora. Estos campos magnéticos son convertidos a valores de conductividad eléctrica aparente (CEa), que mediante calibración con muestras de suelo recolectadas y analizadas en laboratorio, reflejan la salinidad del suelo (CEe). La interpolación de los datos puntuales de salinidad se ha realizado, mediante krigeado ordinario, a malla de $5\text{m} \times 5\text{m}$. Para poder combinar estos mapas con los índices de vegetación derivados de Landsat (obtenidos para píxel de $25\text{m} \times 25\text{m}$), para cada píxel de $25\text{m} \times 25\text{m}$ se ha determinado el valor promedio de CEe de las 25 retículas de $5\text{m} \times 5\text{m}$ incluidas en él. Se obtiene así un mapa ráster de salinidad con resolución de $25\text{m} \times 25\text{m}$, combinable con los mapas de índices espectrales. La distribución de salinidad en fases salinas se puede consultar en Casterad et al. (2011).

Validación y selección de índices espectrales para identificar salinidad

La validación de los índices espectrales para identificar salinidad se ha realizado mediante análisis de correlación lineal entre dichos índices y la CEe. Para ello, se han comparado los mapas de salinidad y de índices espectrales a nivel de píxeles de $25\text{m} \times 25\text{m}$. Para cada parcela y fecha se ha establecido la correlación entre cada índice y la CEe. En el análisis se han excluido los píxeles de borde de las parcelas dado que su respuesta espectral suele corresponder a dos o más cubiertas diferentes.

Las fechas óptimas para la detección de salinidad edáfica en cebada se han establecido identificando las fechas en las que se presentan las mejores correlaciones entre índices y CEe.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra, como ejemplo, la cartografía obtenida (ráster de 25 m de píxel), para una parcela de cebada con graves problemas de salinidad. Se aprecia (Fig. 1b) que la salinidad tiene un efecto muy negativo en el desarrollo y producción del cultivo. Prácticamente toda la parcela es salina ($CEe \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$), y casi la mitad de ella presenta valores de $CEe > 8 \text{ dS m}^{-1}$ (Fig. 1c). Las zonas más salinas, en colores marrones y rojo en la Figura 1c, presentan los niveles más bajos de NDVI, colores naranjas y rojos en la Figura 1d, indicativos del menor desarrollo vegetativo de la cebada.

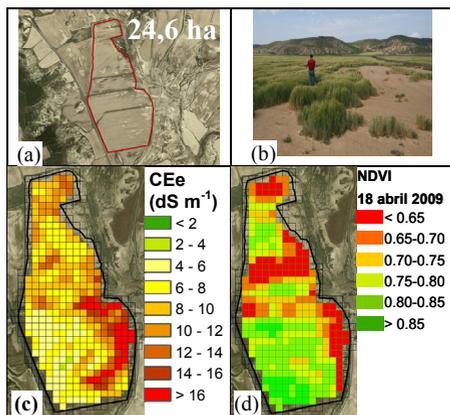


Figura 1: Parcela salina de cebada en seco: **a)** contorno sobre ortofoto; **b)** detalle del efecto negativo de la salinidad en la cebada (foto del 13 de mayo); **c)** mapa de CEE (28 octubre); y **d)** mapa de NDVI (18 de abril).

En las parcelas no salinas ($CEe < 4 \text{ dS m}^{-1}$, SEC-4 y SEC-5 y REG-4; datos no mostrados) y ligeramente salinas ($4 \leq CEe \leq 8 \text{ dS m}^{-1}$; SEC-1 y REG-3, Fig. 2), a menudo la correlación entre índices espectrales y CEE no es significativa y en general los coeficientes de correlación (r) son bajos, no superando nunca un r de 0,55. Sólo alrededor del 30% y 50% de las correlaciones son

significativas en dichos suelos, respectivamente. Estos resultados son coherentes considerando que el rendimiento de la cebada comienza a verse afectado a partir de una conductividad eléctrica (CEe) de 8 dS m^{-1} .

En las parcelas con superficies moderada y fuertemente salinas ($CEe > 8 \text{ dS m}^{-1}$; SEC-2 y SEC-3, REG-1 y REG-2, Figura 2), la relación entre índices y salinidad (CEe) es en general significativa (88% de las correlaciones con $P < 0,05$); Figura 2).

NDVI y EVI son índices de vegetación que combinan información del rojo e infrarrojo cercano (TM3 y TM4) y reflejan el vigor y grado de desarrollo del cultivo. La relación entre ellos y la salinidad (CEe) en las parcelas de estudio es generalmente inversa (Figuras 2a y 2b) e indica que al aumentar el nivel de salinidad en la parcela disminuye el desarrollo del cultivo, por lo que un bajo crecimiento de éste puede ser indicador de la presencia de salinidad.

A pesar de que el EVI es un índice más robusto que NDVI por ser menos sensible a condiciones atmosféricas y edáficas, las correlaciones de CEE con EVI no siempre son mejores que con NDVI, resultados que difieren de los indicados en Lobell et al. (2010).

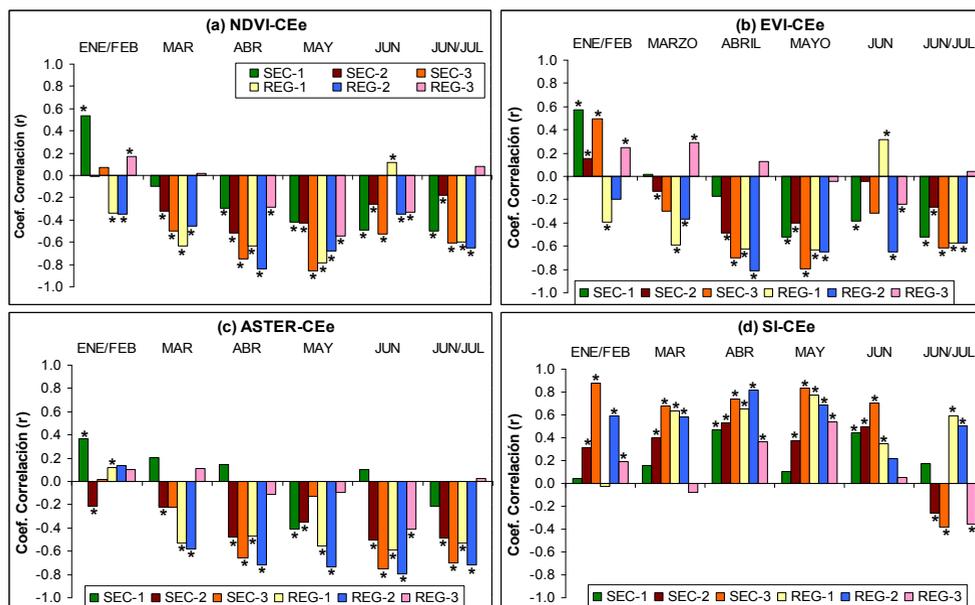


Figura 2: Coeficientes de correlación (r) para diferentes fechas entre la salinidad (CEe) y los índices espectrales (a) NDVI, (b) EVI, (c) ASTER y (d) SI, en parcelas salinas ($CEe \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$) de cebada en seco (SEC-1 a 3) y regadío REG-(1 a 3) y nivel de significación (* P como mínimo $< 0,05$).

El índice SI, calculado a partir de la combinación de las bandas TM2 y TM3 (verde y rojo) detecta el brillo, aspecto que a menudo está asociado con la salinidad (Douaoui *et al.*, 2006). Este índice presenta una relación directa con la salinidad en nuestras parcelas (Figura 2d).

El ASTER es el único de los cuatro índices que combina información del infrarrojo medio (TM5 y TM7) y está indicado para detección de salinidad en suelos desnudos (Al-Khaier, 2003). Pese a esto último, se han encontrado también correlaciones significativas con salinidad, aunque inversas, cuando el cultivo esta presente, e incluso las mejores correlaciones se obtienen cuando el cultivo esta más desarrollado (Fig. 2c).

Las mejores correlaciones se obtienen, en general, en los meses de abril y mayo (Figura 2; r de hasta -0.86), correspondientes al máximo desarrollo del cultivo, y en las parcelas más salinas y con mayor variación en salinidad. Estas fechas son por tanto las mejores para discriminar con imágenes Landsat problemas de salinidad.

En las 6 parcelas salinas (Figura 2), el mayor número de correlaciones significativas se ha obtenido para el NDVI (31), seguido por SI (28), EVI (27) y ASTER (23). Se ha seleccionado el NDVI como índice más apropiado para identificar áreas salinas en cebada.

CONCLUSIONES

Se ha puesto a punto una metodología para combinar en formato ráster índices espectrales con cartografía de salinidad.

Las mejores correlaciones entre los índices espectrales y la CEe se presentan en abril y mayo y en las parcelas más salinas y con mayor variación en salinidad. Dichas correlaciones son significativas y negativas entre CEe y los índices NDVI, EVI y ASTER, y positivas entre CEe y SI.

Se ha seleccionado el NDVI como más apropiado para identificar áreas salinas en las superficies con cebada de la cuenca media del Ebro, ya que, además de ser uno de los que más y mejor correlacionan con salinidad, tiene fácil interpretación y es el más utilizado en bibliografía relacionada con el tema de estudio.

Las fechas óptimas para la detección y seguimiento con imágenes Landsat de la salinidad edáfica en cebada son abril y mayo.

BIBLIOGRAFÍA

AL-KHAIER, F. 2003. *Soil salinity detection using satellite remote sensing*. Thesis Master of Sci. International Institute for GeoInformation Science & Earth Observation, Netherland. 70 pp.

AMEZKETA, E., URDANOZ, V. y ARAGÜÉS, R. 2007. *Cartografía automática de la salinidad del suelo mediante un sensor electromagnético móvil georreferenciado*. Riegos y Drenajes XXI, 153, 34-43.

CASTERAD, M.A., PORTERO, C., BERKANE, Y., BARINAGARREMENTERIA, I., URDANOZ, V., ALBIZUA, L. y AMEZKETA, E. 2011. *Utilidad del NDVI para la discriminación de fases salinas en parcelas con cebada*. XIV Congreso Nacional de la Asociación Española de Teledetección, 4 pp.

DOUAOUI, A., NICOLAS, H. y WALTER, C. 2006. *Detecting salinity hazards within a semi-arid context by means of combining soil and remote sensing data*. Geoderma, 134, 217-230.

HUETE, A.R., LIU, H.Q., BATCHILY, K. y VAN LEEUWEN, W.J.D. 1997. *A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS*. Remote Sensing of Environment, 59, 440-451.

LOBELL, D.B., LESCH, S.M., CORWIN, D.L., ULLMER, M.G., ANDERSON, K.A., POTTS, D.J., DOOLITTLE, J.A., MATOS, M.R. y BALTES, M.J. 2010. *Regional-scale assessment of soil salinity in the red river valley using multi-year MODIS EVI and NDVI*. Journal of Environmental Quality, 30, 35-41.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. y HARLAN, J.C. 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Greenbelt, MD, NASA/GSFC (Type III, Final Report).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el INIA a través del proyecto RTA08-083-C02-00; por el DDRyMA (Gobierno de Navarra); y por el MICIIN y el Fondo Social Europeo (Programa Torres Quevedo, PTQ-08-03-07315).