

CUANTIFICACIÓN DEL USO AGRÍCOLA DE SUELOS CON LIMITANTES SALINAS Y SÓDICAS MEDIANTE EL ÍNDICE NDVI

MARIA BETHANIA AIMETTA^{1*}; SEBASTIÁN ANDRÉS MUÑOZ²; DOLORES BUSTOS³;
VANINA DAVIDENCO⁴; CRISTIAN ROMÁN CAZORLA⁵; CARLOS MARTÍN GALARZA¹;
FERNANDO SALVAGIOTTI⁶

Recibido: 04/09/2019

Recibido con revisiones: 17/11/2019

Aceptado: 20/11/2019

RESUMEN

En los últimos años, en el sudeste de Córdoba la agricultura ha avanzado en suelos con limitantes por salinidad y/o sodicidad, que anteriormente se dedicaban a la actividad ganadera. Sin embargo, no se conoce con claridad que proporción de cultivos se realizan en esta superficie y el índice NDVI es una herramienta que puede ayudar a estimarla. El objetivo de este trabajo fue estimar la superficie con suelos salinos y/o sódicos en el sudeste de Córdoba y cuantificar la superficie implantada con cultivos agrícolas en los mismos. Se utilizó la información de las cartas de suelo en escala (1:50.000), publicada digitalmente en la plataforma GEOINTA, a la que se incorporó el "carácter" de suelo (salino, sódico y salino-sódico) y el grado de limitante (leve, moderado y fuerte) según nivel y proporción en la unidad cartográfica. La superficie ocupada por maíz, trigo y soja fue estimada usando el índice NDVI a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI seriadas en la campaña 2016-2017. Mediante geoprocésos se integró la información de suelos con la de cultivos y se realizaron los cálculos de área. Los suelos salinos y sódicos ocuparon el 30% de la superficie total del departamento Marcos Juárez y el 48% de Unión. En ambos departamentos el 38% de suelos con limitantes se encontraba sembrado con soja, maíz y trigo. En promedio, el 19,5% de la superficie en estos suelos estuvo ocupado por soja, el 10% por maíz y el 9% con trigo. La proporción de estos tres cultivos sobre suelos salinos y sódicos, representó el 17% y 29% de la superficie sembrada en los departamentos Marcos Juárez y Unión, respectivamente. Esto demuestra una proporción significativa de suelos salinos y/o sódicos bajo uso agrícola, resultando necesario ajustar tecnologías de gestión que optimicen la eficiencia de los insumos productivos en estos ambientes.

Palabras claves: cartas de suelo, sistemas de información geográfica, soja, maíz, trigo

QUANTIFYING AGRICULTURE USE IN SALINE AND SODIC SOILS USING NDVI INDEX

ABSTRACT

In recent years, agriculture has advanced in saline or sodic soils previously dedicated to livestock in the Central Pampas of Argentina; however the proportion of crops grown on these soils has not yet been determined, and NDVI index may help in estimating this area. The objectives of this work were to (i) estimate the area occupied by saline and / or sodic soils and (ii) quantify the proportion of these soils planted with crops in southeast Córdoba province. For this purpose, the soil characterization (saline, sodium and saline-sodium) and the degree of constraints (mild, moderate and strong) were incorporated in soil maps, at a scale of 1: 50000. Then, the area covered with maize, wheat and soybean was estimated using the NDVI index from Landsat 8 OLI satellite images for the 2016-2017 season. Finally, a geographical process was carried out integrating soil information with cropped area. Saline and sodic soils occupied 30 and 48% of total area of Marcos Juárez and Unión counties respectively. In both, 38% of soils with limitations were planted with soybean, maize or wheat. On average, 19,5% of the area in these soils was covered with soybean, 10% with corn and 9% with wheat. The proportion of these three crops on saline and sodic soils represented 17% and 29% of the sown area in Marcos Juárez and Unión counties, respectively. These results demonstrate a significant proportion of saline and/or sodic soils under agricultural use, being necessary to adjust management technologies for optimizing input use efficiency in these environments.

Keywords: Soil maps, geographic information systems, soybean, corn, wheat

1 Área Suelos, Producción y Protección Vegetal, EEA Marcos Juárez. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina

2 Grupo Economía, Estadística y Sistemas de Información Geográfica, EEA Marcos Juárez, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina

3 Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales, Centro de Investigaciones Agropecuarias. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina

4 Cátedra de Fisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

5 Asesor CREA, Huinca Renancó. Argentina

6 Grupo Manejo de Cultivos, Suelos y Agua, EEA Oliveros. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina

* Autor de contacto: aimetta.bethania@inta.gov.ar

INTRODUCCION

La salinidad es una problemática que hace referencia al exceso de sales solubles en la solución del suelo, las cuales pueden ser de sodio, potasio, magnesio, calcio, cloruro, sulfato, carbonato y/o bicarbonato. Si bien la fuente original de las sales son los minerales primarios, los suelos salinos se encuentran generalmente en áreas que reciben sales acarreadas y depositadas por agua superficial y subterránea (Richards, 1970). En el caso de la acumulación de sodio y/o sales de sodio en la fase sólida y/o líquida del suelo, se produce la sodificación del suelo, resultando en un aumento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en relación con el total de bases de intercambio (FAO & ITPS, 2015). Otro parámetro utilizado para definir la sodicidad es la relación de adsorción de sodio del extracto de saturación (RAS), que relaciona el contenido de sodio soluble con los cationes divalentes solubles de calcio y magnesio (Lavado & Taboada, 2017). Los suelos se caracterizan como salinos cuando el contenido de sales solubles, medida en niveles de conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (Ce_e), supera los 4 dS m^{-1} , afectando el rendimiento de la mayoría de los cultivos. Por su parte, los suelos sódicos deterioran las condiciones físicas del suelo y afectan a los cultivos cuando el PSI tiene valores superiores al 15% o una RAS mayor a 13% (Richards, 1970; Soil Science Society of America, 2001; Imbellone *et al.*, 2010).

A nivel global, la superficie de suelos hidromórficos es de 1128 millones de has, de las cuales el 60% corresponden a salinos y el 40% restante a sódicos o salino-sódicos (Wicke *et al.*, 2011). Otros estudios informan valores inferiores de suelos hidromórficos, entre 831 (FAO, 2019) y 955 millones de ha (Szalbolcs, 1989). Estas diferencias se deben probablemente a las distintas metodologías utilizadas en cada estimación. América del Sur, con 84 millones de ha afectadas por sales y sodio, se ubica en sexto lugar luego de Medio Oriente, Oceanía, norte de África, Rusia y el este de Asia (Wicke *et al.*, 2011).

En Argentina, específicamente en la provincia de Córdoba, Gorgas & Tassile, (2003) utilizando mapas con escala 1:500.000 o menores, determinaron que el 14% de la superficie total corres-

ponde a suelos con algún nivel de salinidad y el 17% a suelos con elevados contenidos de sodio. Según estos autores, en el sudeste de la provincia de Córdoba, los departamentos Marcos Juárez y Unión poseen 273000 y 465000 ha respectivamente con problemas de salinidad y sodicidad. Además, en los últimos 5 años los principales cultivos anuales implantados en dichos departamentos, fueron un 64 y 52% de soja (*Glycine max L.*), 11 y 8 % de maíz (*Zea mays L.*), y 5 y 4 % trigo (*Triticum aestivum L.*) (MAyG, 2018). Sin embargo, no se conoce actualmente con exactitud la proporción de estos cultivos agrícolas que se realizan sobre suelos con limitantes salinas y/o sódicas.

Las cartas de suelo en escala 1:50.000 publicadas actualmente de manera digital en GEOINTA (2018) disponen de un archivo vectorial con la información principal de cada unidad cartográfica. Esta escala de semi-detalle permite aumentar la precisión y mejorar la clasificación de suelos, pero actualmente, la capa no cuenta con los atributos de salinidad y/o sodicidad disponibles en la versión impresa. Los suelos con valores de sales y/o sodio por encima de los niveles de referencia, se clasifican en ocho clases de capacidad de uso según la intensidad de la limitante, siendo II cuando es leve y VIII cuando dicha limitante es fuerte. La determinación de la ubicación geográfica de cada unidad, con sus limitantes por sales y/o sodio, permite anexar información sobre la cobertura y uso del suelo. Esta superposición de información permitiría conocer el tipo de manejo al que se encuentran expuestos estos suelos y la magnitud de uso agrícola.

La superficie agrícola destinada al cultivo de soja en Argentina pasó de 25000 ha a más de 19,5 M ha entre las campañas 1969-1970 y 2015-2016 con un incremento del 18,6% en los últimos 10 años (MAyG, 2017). El aumento de la superficie agrícola, principalmente soja y maíz, se ha realizado sobre suelos con capacidad de uso III y superiores con algunas limitantes como es el caso de los suelos con exceso de sales y sodio originariamente dedicados a la actividad ganadera (Paruelo *et al.*, 2005).

La información de sensores remotos, como por ejemplo las imágenes multiespectrales Land-

sat 8 OLI, pueden relevar áreas extensas con determinada frecuencia y extensión temporal. Con estas imágenes se realiza el cálculo del índice de vegetación normalizado (NDVI), utilizado para estimar el uso y cobertura del suelo. El NDVI es un indicador numérico empleado para detectar la presencia de vegetación sobre la superficie del suelo basado en los patrones de reflectancia de la vegetación verde (Chuvienco, 1995). Una cubierta vegetal en estado activo de crecimiento, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano que es reflectada en su mayoría (Chuvienco, 1995). Cada cultivo tiene un calendario de fechas de siembra y cosecha, con diferentes patrones de crecimiento estacional, dependiente de las condiciones climáticas locales. Este patrón de crecimiento define una firma fenológica o marcha estacional de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes, que es particular para cada tipo de cultivo lo cual permite estimar su presencia a partir del NDVI. Este índice ha sido utilizado con buenos resultados para evaluar el cambio en la vegetación (Gandhi *et al.*, 2015), el patrón de cultivos (Nosetto *et al.*, 2005; Bharathkumar & Mohammed-Aslam, 2015) y el crecimiento vegetal en áreas contaminadas (Sonwalkar *et al.*, 2010).

El relevamiento de los cultivos principales de un área mediante el índice NDVI se pueden combinar con mapas de suelos que indican limitantes salinas y/o sódicas utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Con este procesamiento de información se podrá cuantificar la superficie de suelos salinos y sódicos implantados con soja, maíz y trigo y comprender la magnitud de la expansión agrícola sobre suelos con restricciones ambientales. Además, esta información resulta fundamental para seleccionar las prácticas de manejo de suelo y cultivo que deban realizarse para incrementar la productividad de los sistemas y disminuir el riesgo de deterioro de estos suelos.

La hipótesis del presente trabajo es que el cultivo de soja ocupa la mayor proporción de la superficie implantada con cultivos agrícolas en suelos salinos y/o sódicos del sudeste de la provincia de Córdoba, debido a la gran plasticidad del cultivo. La información de las características salinas

o sódicas incorporada a la base de datos de suelo, en combinación con la información de la superficie cultivada con los principales cultivos del área mediante imágenes satelitales estimará con precisión la magnitud de la superficie dedicada a la agricultura en suelos con limitantes por salinidad o sodicidad.

Los objetivos del presente estudio fueron: (i) Estimar la distribución geográfica de suelos afectados por salinidad y/o sodicidad y (ii) cuantificar la superficie dedicada a los principales cultivos agrícolas sobre estos suelos mediante el uso del índice NDVI en el sudeste de la provincia de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La investigación fue desarrollada en los departamentos Unión y Marcos Juárez, ubicados al sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina, entre los 32° y 34° de latitud sur (**Figura 1**). El departamento Unión ocupa una superficie de 1.094.716 ha y Marcos Juárez 924.532 ha (IDECOR, 2018). Esta área está incluida dentro de la "Pampa Interna" según la clasificación de Hall *et al.* (2006).

La metodología general del trabajo consistió en combinar (i) la información de las características edáficas del área incluida en las cartas de suelo digitalizadas con (ii) la información del área sembrada con trigo, soja y maíz proveniente del NDVI utilizando las imágenes Landsat 8 OLI.

Procesamiento de las cartas de suelo

Se tomó como base las capas de información de la clasificación de suelos en escala 1:50.000 de la provincia de Córdoba en formato digital disponibles en la plataforma GEOINTA (2018). Con herramientas de geoproceso incluidas en el software QGIS, versión 2.18 (2016), se recortó el archivo vectorial de los suelos de Córdoba, que contiene los polígonos de las unidades cartográficas utilizando como máscara las capas vectoriales de los departamentos Unión y Marcos Juárez del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2016).

A partir de las cartas de suelos impresas se incorporaron los parámetros "carácter" y "grado"

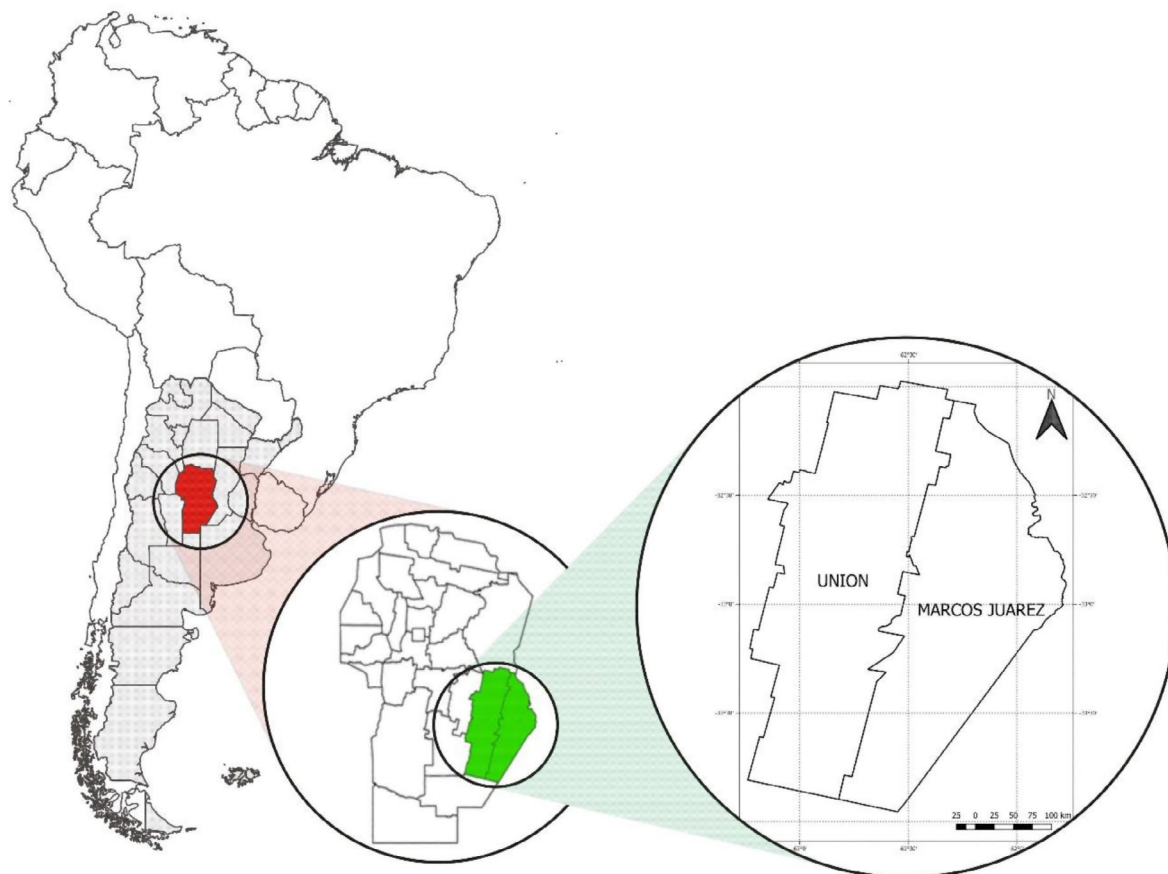


Figura 1. Ubicación geográfica del área donde se estimaron la proporción de suelos salinos y/o sódicos bajo uso agrícola.

Figure 1. Geographic location of the area where the proportion of saline and / or sodium soils under agricultural use was estimated

a las capas vectoriales de suelo de los departamentos. Con los datos analíticos de cada una de las unidades cartográficas se construyeron y anexaron ambos atributos a la tabla de datos del archivo digital de la capa de suelos. El “Carácter” hace referencia al tipo de unidad y se clasificaron en: salino, salino-sódico y sódico, entre otras características (arroyo, laguna, río, acumulación, desarrollo, drenaje, dureza, erosión, escurrimiento, indeterminado, sin limitantes y urbano). Se consideró al suelo como salino cuando el valor de conductividad eléctrica del extracto (Cee) era superior a 4 dS m^{-1} y sódico cuando el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) fue superior a 15 (Richards, 1970). Por otro lado, el “Grado” fue clasificado en tres niveles: leve, moderado o fuerte en función de lo puntualizado en la descripción del suelo. En caso de no estar especificado se clasificó teniendo en cuenta los niveles de sales y/o sodio de cada serie y la proporción que ocupa la serie en el complejo en las

unidades cartográficas compuestas. Así, un complejo de suelos donde una de las series posee valores de sales y/o sodio muy por encima del umbral o que tenga valores similares a éste pero que ocupe una gran proporción del complejo (más del 40%) fue clasificado como de grado fuerte. Debido a la escala de reconocimiento, los complejos de suelos no pueden ser divididos en series puras, por lo que el “carácter” salino o sódico de la unidad o el “grado” de la misma, estuvo ligado a las características de al menos una de las series que lo integran.

Procesamiento de las imágenes satelitales - Cobertura de suelo con cultivos

Se utilizaron imágenes LANDSAT 8 OLI de la campaña 2016-2017 con una resolución espacial de 30 m, temporal de 16 días de revisita y una espectral de 11 bandas del path/row 228/82 y 228/83 (sudeste de la provincia de Córdoba) (**Figura 2**), descargadas del United States Geological

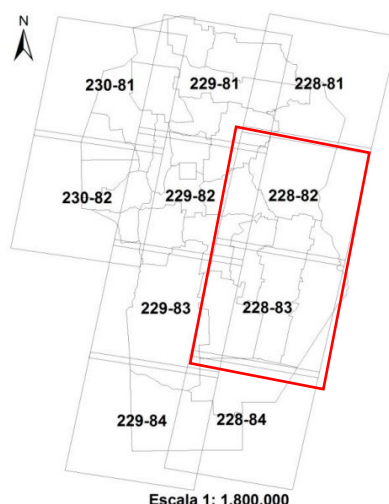


Figura 2. Distribución geográfica de los mosaicos de imágenes Landsat 8 OLI para los “path”/“row” 228-82 y 228-83.

Figure 2. Geographical distribution of Landsat 8 OLI image mosaics for the path / row 228-82 and 228-83.

Survey (USGS, 2018). En función de los cultivos de trigo, soja y maíz a detectar, las fechas de siembra y floración de cada uno y el conocimiento previo de la zona, se seleccionaron las imágenes de los meses de septiembre, diciembre, enero, marzo, abril y junio libre de nubes (**Tabla 1**).

Tabla 1. Secuencia de fechas de las imágenes analizadas con NDVI y de los filtros utilizados para detección del cultivo.

Table 1. Date sequence of the images analyzed with NDVI and the filters used for crop detection.

Cultivo	Capa NDVI entrada		Capa NDVI máscara	
	Fecha	Filtro	Fecha	Filtro
Trigo	8/9/2016	0,35		
Soja 1°	30/1/2017	0,85	13/12/2016	0,75
Soja 2°	19/3/2017	0,8	30/1/2017	0,85
Maíz 1°	13/12/2016	0,75	8/9/2016	0,35
Maíz 2°	20/4/2017	0,70		

Se realizó un pre procesamiento de las imágenes utilizando el complemento “semi-automatic classification plugin (SCP)” dentro de QGIS con una corrección atmosférica Dark Object Subtraction (DOS1). La corrección atmosférica repara el efecto de dispersión de energía electromagnética en las partículas de agua suspendidas en la atmósfera, restando de la imagen los valores que éstas agregan a los datos, permitiendo la comparación de imágenes tomadas en momentos diferentes.

En el programa QGIS se realizó la combinación de las bandas corregidas y la unión de los mosaicos de cada fecha que luego se recortaron con las capas de los límites departamentales de Unión y Marcos Juárez utilizadas como máscara. Posteriormente se realizó el cálculo del NDVI de cada imagen con la calculadora ráster dentro del software.

$$NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo. Este cálculo con imágenes Landsat 8 se realiza:

$$NDVI = \frac{\text{banda 5}-\text{banda 4}}{\text{banda 5}+\text{banda 4}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Una vez obtenidas las imágenes de NDVI se filtraron los valores del índice, estableciendo límites por encima de los cuales se clasificó la mayor cantidad de píxeles del cultivo predominante en cada fecha (**Tabla 1**) con la utilización de los puntos de control de cultivo (PCC). Los PCC son lotes de trigo, maíz y soja que fueron relevados a campo en la campaña 2016-2017 y que constituyen la “verdad de campo”. Los píxeles cuyos valores del índice fueron inferiores al límite fijado en cada fecha fueron clasificados como “no cultivo”. Posteriormente los archivos de imagen se transformaron en capas de archivos vectoriales de polígonos para calcular la superficie ocupada con trigo, maíz de 1° y 2° tardío y soja de 1° y 2° o tardía.

Cada capa se corrigió en dos etapas, la primera fue restando los polígonos clasificados en la fecha posterior y la segunda una corrección manual en función de la forma de los polígonos y los valores de reflectancia de la imagen original. En la primera etapa se lograron separar cultivos de trigo de otros verdeos de invierno y la soja del maíz, evitando así una doble clasificación de los mismos polígonos en dos fechas diferentes. En la segunda se eliminaron todos aquellos polígonos que no corresponden a lotes de producción como son los cascos de las estancias, los arbolados, las márgenes de ríos o canales, lotes cubierto de malezas y lotes con forrajeras detectadas por

la forma de cultivo. Estas correcciones pudieron ser realizadas teniendo conocimiento de la zona, las formas de cultivo, las fechas de siembra, cosecha y la fenología de cada cultivo, junto a las condiciones climáticas del periodo analizado que modifican las prácticas agrícolas.

En situaciones donde los suelos poseen altos niveles de salinidad y/o sodicidad los cultivos muestran síntomas de toxicidad y deficiencias nutricionales, con valores de NDVI bajos. En estos sitios el NDVI se correlaciona negativamente con los niveles de Ce y sodio en el suelo (Saipur *et al.*, 1994). Por lo cual, en el presente trabajo se ajustaron los valores de los filtros de la clasificación teniendo en cuenta los puntos de control a campo de manera de detectar los cultivos con bajo NDVI.

El área estimada fue comparada con los datos de superficie cosechada publicados por la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA) y por el ministerio de Agricultura y Ganadería de Córdoba (MA-GyA) para conocer la exactitud de la clasificación (**Tabla 2**). Además, se comparó el grado de acierto entre los puntos de evaluación de la verdad de campo y la clasificación obtenida con NDVI a través del índice de fiabilidad global cartográfica (Chuvieco, 2010) calculado como:

$$\frac{\sum \text{puntos coincidentes}}{\sum \text{puntos muestreados}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Los puntos de la verdad de campo corresponden a 373 lotes georreferenciados en la transectas realizadas en los departamentos Unión y Marcos Juárez con cultivos de trigo, maíz y soja en pleno crecimiento durante la campaña 2016-2017. Una de las capacidades de los sistemas de información geográfica (SIG) es la integración por superposición que se refiere a la coincidencia espacial entre diferentes elementos geográficos que permite la correlación de variables por localización geográfica. A partir de esto se combinó la información de la clasificación de suelos con la de cultivos aplicando el método de intersección de archivos vectoriales dentro de QGIS. Como resultado se obtuvo la información del tipo de suelo, que cultivo se desarrolla sobre él y la estadística de zona con los datos de NDVI para cada fecha.

Tabla 2. Superficie cosechada de maíz soja y trigo de la campaña 2016-2017 en los departamentos Marcos Juárez y Unión según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAyG) y la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA).

Table 2. Harvested area of corn, soybean and wheat 2016-2017 season in Marcos Juárez and Unión counties, according to Ministry of Agriculture and Livestock (MAyG) and Córdoba Cereal Bag (BCCBA).

Departamento	Cultivo	MAyG (ha)	BCCBA (ha)
Marcos Juárez	Maíz	164940	155856
	Soja	456915	444590
	Trigo	125680	137005
Unión	Maíz	212470	149924
	Soja	420107	403353
	Trigo	172620	155119

Análisis de datos y evaluación de resultados

El conjunto de datos fue pre procesado para crear “rasters” como primer paso y se aplicaron las funciones de álgebra de mapas, que incluyen la suma y diferencia, para asociar las estadísticas calculadas al “raster” de salida para la visualización. En segunda instancia, los “rasters” se transformaron a formato “shape” para realizar los cálculos de área y las estadísticas descriptivas de las clasificaciones obtenidas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Superficie de suelos con limitantes por salinidad o sodicidad

A partir del cálculo de área de cada polígono de suelo con los caracteres agregados a la base de datos, se pudo determinar que la superficie afectada por sales y sodio es del 30 y 48% de la superficie total de los departamentos Marcos Juárez y Unión respectivamente (**Tabla 3**). En ambos departamentos, la mayor proporción correspondió a suelos que tienen elevados contenidos tanto de sodio como de sales, mientras que los suelos sódicos y salinos puros sólo representaron el 6,4% de la superficie total de Marcos Juárez y 7,5% de Unión (**Tabla 3**). Estudios previos, utilizando la escala de 1:500.000 a nivel provincial y escalas de semi-detalle para la zona que abarca este análisis, indican que los suelos clasificados como salinos o sódicos representaban el 29% de la superficie total de Marcos Juárez y el 42%

Tabla 3. Superficie de suelos con limitantes salinas, salino-sódicas y sódicas en Marcos Juárez y Unión.
Table 3. Soil surface with saline, saline-sodic and sodic limitations in Marcos Juárez and Unión.

Departamento	Superficie total	Salinos		Salino-sódicos		Sódicos		Total limitantes	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Marcos Juárez	935030	4851	0,5	226092	24,2	54929	5,9	285872	30,6
Unión	1067561	15511	1,5	432813	40,5	64680	6,1	513004	48,1

de Unión (Gorgas & Tassile, 2003). Sin embargo, el presente estudio logra diferenciar los suelos en tres categorías, incorporando a los salino-sódicos en la clasificación, detectando su mayor participación en la clasificación ocupando el 24% de Marcos Juárez y el 40% de Unión. Además, este estudio permitió generar un mapa definido de la ubicación geográfica de cada tipo de suelo, anexando nueva información como la de cultivos.

Los suelos con limitantes salinas y sódicas se distribuyeron de manera diferente sobre el territorio departamental (Figura 3A). La zona norte de ambos departamentos mostró un predominio de suelos salino-sódicos que cubren de forma homogénea el territorio y que concentran el 88% de este tipo de suelos en Marcos Juárez y el 68%

en Unión. Por el contrario, más del 90% de los sódicos se concentran en el sur de ambos departamentos pero de manera aislada, ocupando principalmente zonas de bajos y vías de escurrimiento principalmente (Figura 4). Sin embargo, los niveles de intensidad tienen una distribución variable en todo el territorio sin presentar un patrón determinado (Figura 3B). Es importante tener en cuenta el nivel de la escala de reconocimiento de la clasificación realizada, ya que dentro de un complejo denominado salino o sódico pueden encontrarse áreas sin limitantes, que permiten realizar un manejo de cultivos diferenciando ambientes de alta y de baja producción modificando el uso de insumos. En estos sitios suele observarse un crecimiento desuniforme o “manchoneo”

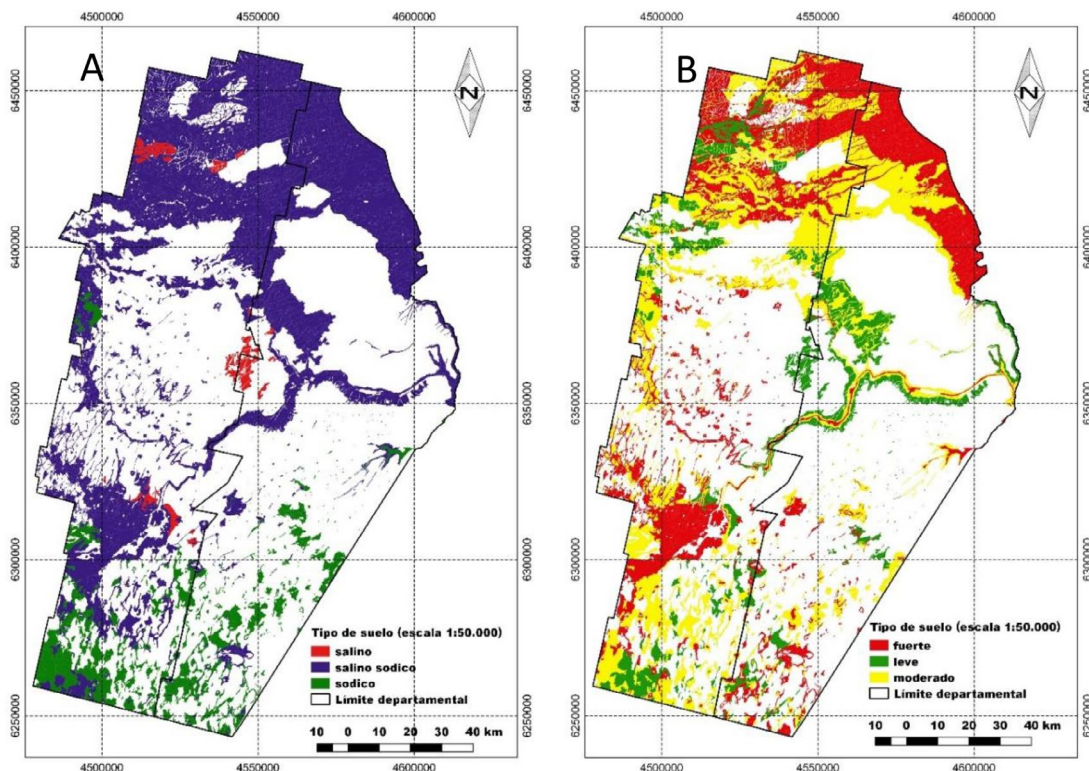


Figura 3: Distribución de A) suelos salinos, sódicos y salino-sódicos y B) niveles de salinidad-sodicidad de los departamentos Marcos Juárez y Unión.

Figure 3. Distribution of A) saline, sodic and saline-sodic soils and B) salinity-sodicity levels B) of Marcos Juárez and Unión counties

de los cultivos implantados similar a los síntomas descritos por Rengasamy (1997) para suelos sódicos de Australia, debido a la heterogeneidad en la distribución de sodio en el suelo.

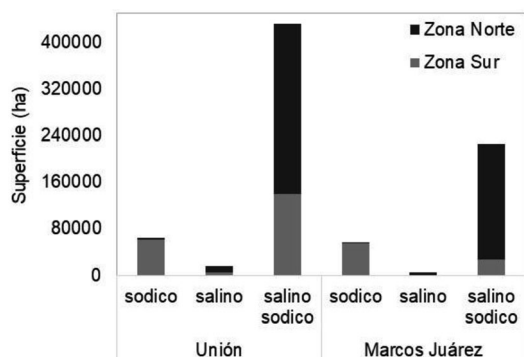


Figura 4. Distribución de suelos salinos, sódicos y salino-sódicos en la zona norte y sur de los departamentos Marcos Juárez y Unión.

Figure 4. Distribution of saline, sodic and saline-sodic soils in the north and south of Marcos Juárez and Unión counties

Superficie de Cultivos

La estimación de cobertura con los valores de NDVI detectan vegetación creciendo activamente y vigorosa, ya que los valores del índice se han encontrado relacionados con parámetros de fotosíntesis y transpiración foliar, y con la producción de biomasa del cultivo (Sellers, 1985). Por lo que es de esperar en una clasificación de escala regional, áreas donde los cultivos se encuentren muy estresados o con muy bajo crecimiento no alcancen a ser detectados por el algoritmo. La estadística de los valores del índice obtenidos en las clasificaciones de cada imagen

pueden observarse en la **Figura 5**. Las diferencias observadas en los valores de NDVI permitieron discriminar entre cultivos y se deben a las variaciones en la fecha de la imagen utilizada, el estado fenológico y las características propias de los cultivos (Lillesand *et al.*, 2004).

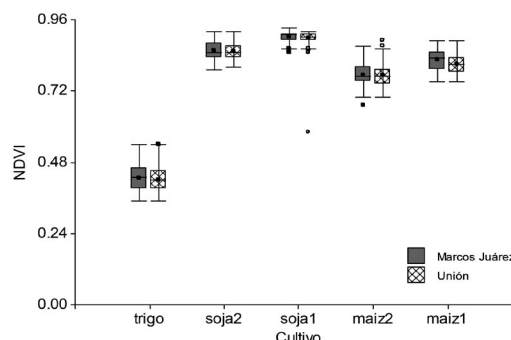


Figura 5. Valores del NDVI para cada cultivo en los departamentos Marcos Juárez y Unión para Trigo, Soja2 (Soja de 2°), Soja1 (Soja de 1°), Maíz2 (Maíz de 2°) y Maíz1 (Maíz de 1°).

Figure 5. NDVI values for each crop in Marcos Juárez and Unión counties to Wheat, Soybean2, Soybean1, Corn2, and Corn1."

La superficie total estimada con los cultivos de maíz, soja y trigo en la campaña 2016-2017 representó respectivamente el 16, 44 y 13% de Marcos Juárez y el 14, 33 y 14% de Unión (**Tabla 4**), con un índice de fiabilidad global del 85,5%. Gráficamente, la distribución espacial de cultivos de manera individual puede observarse en la **Figura 6** para trigo (A), maíz (B) y soja (C). Los valores de superficie estimada en el presente trabajo para los departamentos Marcos Juárez y Unión, fueron inferiores a los datos pu-

Tabla 4. Superficie estimada con NDVI de cultivos de maíz, soja y trigo de la campaña 16-17 y porcentajes de similitud con los valores publicados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAyG) y la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA) para los departamentos Marcos Juárez y Unión.

Table 4. Estimated area with NDVI of corn, soybean and wheat crops in 2016-2017 season and percentages of similarity with published values by Ministry of Agriculture and Livestock (MAyG) and Córdoba Cereal Bag (BCCBA) in Marcos Juárez and Unión counties

Departamento	Cultivo	Superficie estimada NDVI		Similitud (%)	
		ha	%	Superficie Cosechada (MAyG)	Superficie Cosechada (BCCBA)
Marcos Juárez	Maíz	148691	15,8	90,1	95,4
	Soja	414830	44,2	90,8	93,3
	Trigo	121027	12,9	96,3	88,3
Unión	Maíz	144800	13,7	68,2	96,6
	Soja	351084	33,2	83,6	87,0
	Trigo	145854	13,8	83,3	94,0

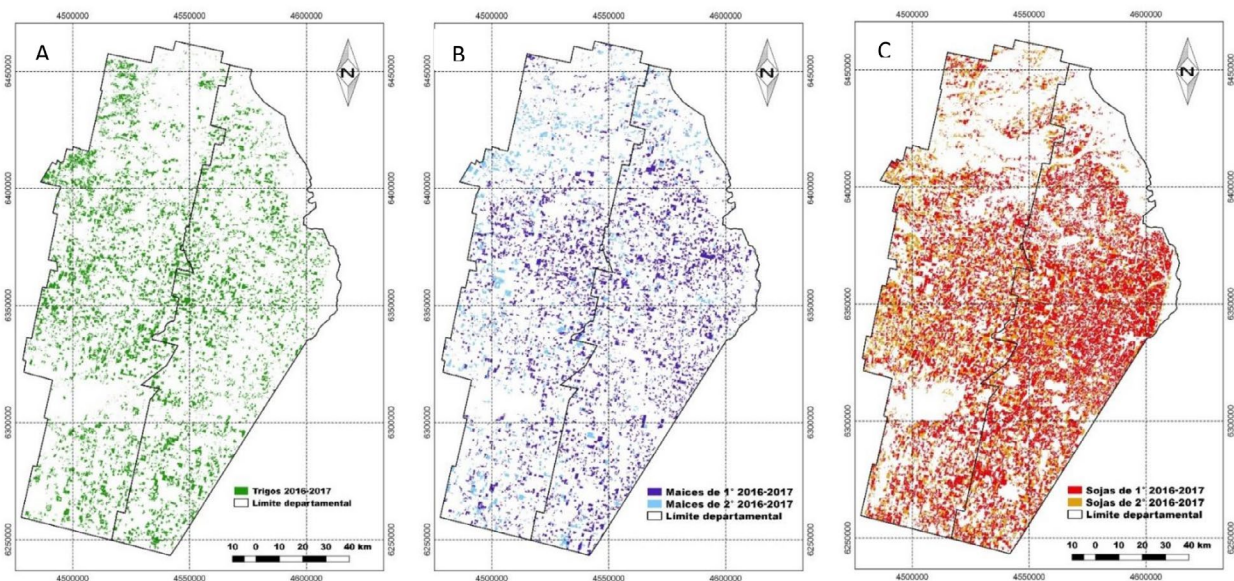


Figura 6. Distribución de la superficie estimada del cultivo de A) trigo B) maíz de 1° y 2° y C) soja de 1° y 2° de la campaña 2016-2017 en los departamentos Marcos Juárez y Unión.

Figure 6. Distribution of the estimated crop area of A) wheat B) corn of 1st and 2nd and C) soybeans of 1st and 2nd 2016-2017 season in Marcos Juárez and Unión counties.

blicados por el MAyG y la BCCBA. Sin embargo, la clasificación realizada representa en todos los casos valores superiores al 80% de lo publicado por ambos organismos (**Tabla 4**). Estas diferencias se deben principalmente a las variaciones en las metodologías y algoritmos utilizados en la clasificación. El departamento de información agroeconómica de la BCCBA, en las estimaciones finales de superficie de cultivos utilizó clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales validadas por registros a campo y una base de datos de cultivos relevados por informantes calificados (Alonso, com. pers.). Por otro lado, el MAyG de la provincia de Córdoba estima la superficie de cultivos valiéndose de diferentes fuentes de información como la bolsa de cereales, productores referentes de cada zona, empresas de venta de insumos, acopios de grano, cooperativas y recorridas a campo de informantes calificados (Gigena, com. per.). La clasificación realizada en el presente trabajo se diferencia en que fue no supervisada mediante NDVI con corrección de lotes mediante el uso de cultivos relevados a campo durante la misma campaña, conocimiento de la zona y de las formas de producción.

Los resultados de fiabilidad y similitud con los valores publicados por el MAyG y la BCCBA obte-

nidos en este trabajo, demuestran la factibilidad de utilizar de manera conjunta el NDVI calculado a partir de imágenes satelitales y las correcciones por verdad de campo para la estimación de cobertura del suelo. La técnica de NDVI ha sido utilizada con éxito para evaluar la remediación de ambientes afectados por la actividad minera (Sonwalkar *et al.*, 2010), para generación de mapas de oportunidad de siembra de cultivos (Bharathkumar & Mohammed-Aslam, 2015) o para detectar cambios en la vegetación del suelo (Gandhi *et al.*, 2015).

Superficie de cultivos en suelos con limitantes por sales o sodio

A partir de la intersección de las capas de cultivos con la capa de suelos se detectó que el 17% y 29% del área sembrada con trigo, soja y maíz en Marcos Juárez y Unión respectivamente, se realiza sobre suelos con limitantes de tipo salinas, sódicas y salino-sódicas (**Tabla 5**). De dicha superficie la mitad correspondió a soja, ocupando 61255 ha en Marcos Juárez y de 94051 ha en Unión. Esta representó el doble de la superficie sembrada con maíz y con trigo en ambos departamentos. Sin embargo, solo una proporción de los suelos con este tipo de limitantes se destinó

Tabla 5. Superficie total de maíz soja y trigo por departamentos y porcentaje de estos cultivos sobre suelos con limitantes salinas y sódicas.

Table 5. Total area of corn, soybean and wheat by counties and percentage of these crops on soils with saline and sodium limits.

Departamento	Cultivo	Total general	Total sobre limitantes	%
Marcos Juárez	Maíz 1°	121132	18064	14,9
	Maíz 2°	27558	12551	45,5
	Total maíz	148690	30615	20,6
	Soja 1°	324636	46711	14,4
	Soja 2°	90194	14544	16,1
	Total soja	414830	61255	14,8
	Trigo	121027	25414	21,0
	Total cultivos	684547	117284	17,1
Unión	Maíz 1°	91571	22780	24,9
	Maíz 2°	53229	25633	48,2
	Total maíz	144800	48413	33,4
	Soja 1°	228523	56082	24,5
	Soja 2°	122562	37969	31,0
	Total soja	351085	94051	26,8
	Trigo	145854	45853	31,4
	Total cultivos	641739	188317	29,3

a la agricultura, lo que representó en la campaña de análisis al 41% en Marcos Juárez y al 37% en Unión (**Figura 7**). Si bien los datos corresponden a una sola campaña de análisis, estos porcentajes confirman una menor proporción y grado de limitantes de suelo en Marcos Juárez respecto a Unión.

La relación de gramíneas/leguminosa (trigo+maíz/soja) total en Marcos Juárez fue de 0,65 y se incrementó a 0,91 en ambientes con sales o sodio, mientras que en el departamento Unión el cociente pasó de 0,83 a 1,00 sobre suelos con limitantes. Se observó que la proporción de gramíneas aumentó en condiciones de sa-

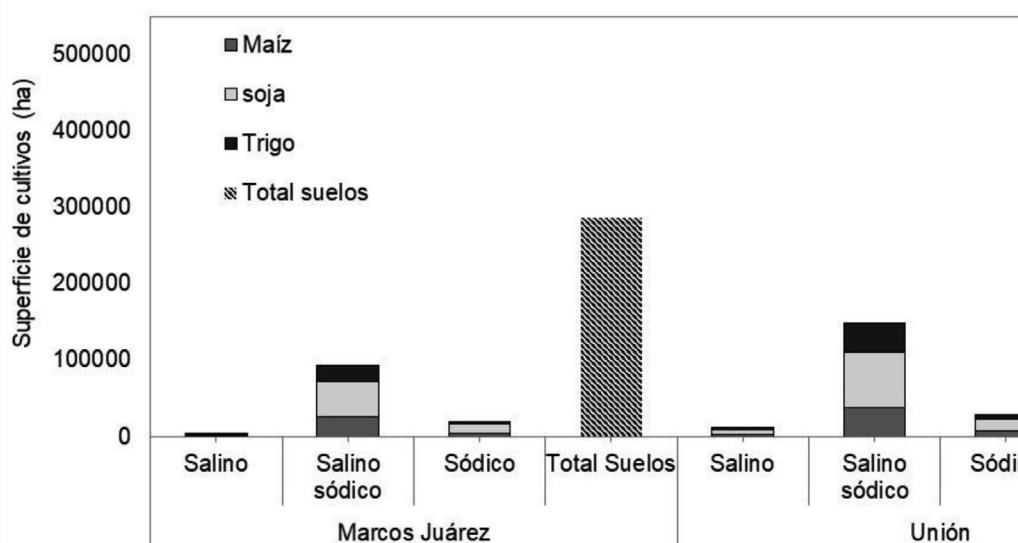


Figura 7. Suelos salinos, salino-sódicos y sódicos con cultivos de maíz, soja y trigo en Marcos Juárez y Unión.

Figure 7. Saline, saline-sodic and sodic soils with corn, soy and wheat crops in Marcos Juárez and Unión.

linidad o sodicidad, llegando a igualar en el caso de Unión la superficie con soja. En Marcos Juárez la relación trigo/cultivos de verano (soja+maíz), fue de 0,21 en general y se incrementó a 0,28 en suelos con limitantes por sales o sodio. En el departamento Unión, esta relación fue mayor (0,29 y 0,32 para el total de la superficie y en suelos salinos sódicos, respectivamente), debido probablemente a la mayor abundancia de niveles fuerte y moderado de las limitantes en el departamento Unión. A pesar de que en ambos casos aumenta la proporción de trigo en suelos salinos o sódicos, la relación maíz/soja fue la que presentó la mayor variación. Este cociente fue 0,36 en el total de la superficie y 0,50 en suelos con limitantes en el departamento Marcos Juárez, mientras que en el departamento Unión, estos valores fueron respectivamente 0,41 y 0,51. Entonces, el aumento en la relación gramíneas/leguminosa estuvo más relacionado con el aumento de la proporción del cultivo de maíz en las zonas con limitantes salinas y sódicas. Estas comparaciones que muestran a la soja y maíz en proporciones similares en suelos con limitantes por salinidad o sodicidad y el trigo en menor proporción, estarían relacionadas con las variaciones en los niveles de tolerancia a la salinidad entre cultivos. Según Bohn *et al.* (2002) y Katerji *et al.* (2003) el trigo es un cultivo más tolerante a sales con respecto a soja y maíz que poseen niveles similares de sensibilidad. Estos resultados se contraponen a la hipótesis planteada en el presente estudio, en donde se consideraba que la soja ocuparía mayor superficie sobre suelos salinos o sódicos, teniendo en cuenta su plasticidad ante condiciones ambientales adversas dada según Kantolic *et al.* (2010) por la extensión del periodo crítico de determinación del número de granos y la superposición de etapas vegetativa y reproductiva. En línea con estas observaciones, Mass & Offman, (1977) la consideran como moderadamente tolerante, con variaciones según las distintas variedades (Abel & MacKenzie, 1964; Velagaleti & Schweitzer, 1993). Además, se debe tener en cuenta que la sensibilidad de cada cultivo también depende de la demanda evaporativa durante el periodo de crecimiento, la longitud del periodo de floración y la relación con los organismos fijadores de nitrógeno (Katerji *et al.*, 2001, 2003).

CONCLUSIONES

En el sudeste de la provincia de Córdoba el 40% de la superficie se encuentra afectada por elevados contenidos de sales y/o sodio en el suelo. El uso del índice NDVI en combinación con los mapas de suelos determinó que del área total sembrada con trigo, soja y maíz en la campaña 2016-2017, la mitad de dicha superficie correspondió a soja mientras que trigo y maíz en proporciones similares ocuparon el resto del área. Esto contradice lo planteado en la hipótesis de trabajo, que establecía al cultivo de soja como predominante en suelos con limitantes salinas y sódicas debido la plasticidad que ésta presentaría en la expresión del rendimiento, sugiriendo que otros factores pudieron haber afectado la decisión de implantar maíz o trigo en suelos con esas limitantes.

AGRADECIMIENTOS

A los profesionales de INTA Manfredi Verónica Bustos del Plan Mapa de Suelos, Nicolás Mari y Diego Pons, por su orientación y colaboración. A Cesar Alonso de la bolsa de Cereales de Córdoba y Guillermo Gigena del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Córdoba. Este trabajo fue financiado con fondos de Beca de posgrado del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Marcos Juárez (resolución 086/14) y los proyectos nacionales (PNAGUA 1133033, PNSUELO 1134022), la Red de Información Agroeconómica Nacional (RIAN) y proyectos territoriales (CORDO 1262101 y 1262103) de la cartera INTA 2013.

BIBLIOGRAFÍA

- Abel, GH & AJ MacKenzie. 1964. Salt Tolerance of Soybean Varieties (*Glycine max* L. Merrill) During Germination and Later Growth1. *Crop Sci.* 4: 157.
- Bharathkumar, L & MA Mohammed-Aslam. 2015. Crop Pattern Mapping of Tumkur Taluk Using NDVI Technique: A Remote Sensing and GIS Approach. *Aquat. Procedia* 4: 1397-1404.
- Bohn, HL; BL McNeal & GA O'Conor. 2002. Salt-affected soils. In: Bohn HL; BL McNeal; & GA O'Conor (eds.). *Soil chemistry*. Pp. 280-307. New York.
- Chuvieco E. 1995. *Fundamentos De Teledeteccion Espacial*. Madrid, España. 449 pp.

- Chuvieco E. 2010. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. Barcelona, España. 528 pp.
- Demaría, MR; I Aguado Suárez & DF Steinaker. 2008. Reemplazo y fragmentación de pastizales pampeanos semiáridos en San Luis, Argentina. : 55–70.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2019. More information on Salt-affected soils Portal de Suelos de la FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por-salinidad/more-information-on-salt-affected-soils/es/>. Ultimo acceso: 2019.
- FAO & ITPS (Food and Agriculture Organization & Intergovernmental Technical Panel on Soils). 2015. Introduction. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ed.). Status of the world's soil resources (SWSR)-Technical summary. Pp. 1–5. Rome, Italy.
- Gandhi, GM; S Parthiban; N Thummalu & A Christy. 2015. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District. *Procedia Comput. Sci.* 57: 1199–1210.
- GEOINTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2018. Visor GeoINTA - Suelos de Córdoba. <http://visor.geointa.inta.gov.ar/>. Ultimo acceso: 2018.
- Gorgas JA & JL Tassile (eds.). 2003. Recursos naturales de la provincia de cordoba Los suelos. Agencia Córdoba Ambiente S. E., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi. Córdoba, Argentina. 512 pp.
- IDECOR (Infraestructura de datos Espaciales Córdoba). 2018. Mapa Base Córdoba. <https://idecor-ws.cba.gov.ar/maps/5/view>. Ultimo acceso: 2018.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional). 2016. Capas SIG | Instituto Geográfico Nacional. <http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>. Ultimo acceso: 2016.
- Imbellone PA; JE Giménez; & JL Panigatti. 2010. Suelos de la Región Pampeana. Procesos de formación. Ediciones INTA. Buenos Aires. 320 pp.
- Katerji, N; JW Van Hoorn; A Hamdy & M Mastrorilli. 2001. Salt tolerance of crops according to three classification methods and examination of some hypothesis about salt tolerance. *Agric. Water Manag.* 47: 1–8.
- Katerji, N; JW Van Hoorn; A Hamdy & M Mastrorilli. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agric. Water Manag.* 62: 37–66.
- Rengasamy, P. 1997. Sodic soils. . In: Lal R; WH Blum; C Valentini; & BA Stewart (eds.). *Methods for Assessment of Soil Degradation*. Pp. 265–277. USA.
- Lillesand, TM; RW Kiefer & JW Chipman. 2004. Earth resource satellites operating in the optical spectrum. In: Lillesand TM; RW Kiefer; & JW Chipman (eds.). *Remote sensing and image interpretation*. Pp. 397–490. EEUU.
- Mass, E V & GJ Offman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 2: 19.
- MAYG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2017. Datos Abiertos Agroindustria. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> Ultimo acceso: 2017.
- MAYG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2018. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <http://magya.cba.gov.ar/Umsiia.aspx>. Ultimo acceso: 2018.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy & JM Paruelo. 2005. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 11: 1101–1117.
- Paruelo, J; J Guerschman & S Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Cienc. hoy* 15: 14–23.
- Hall, AJ; CM Rebella; CM Ghera & JP Culot. 2006. 9957. pdf. In: Pearson CJ (ed.). *Ecosystems of the world, field crop ecosystems*. Pp. 413–450. Amsterdam.
- QGIS, DT. 2016. QGIS. Geographic information system. <https://www.qgis.org/es/site/>. Ultimo acceso: 2016.
- Richards LA (ed.). 1970. Diagnostico y rehabilitacion de suelos salinos y sodicos. Centro Regional de Ayuda Técnica, AID. Mexico. 172 pp.
- Saipur, R; GF Vance & C Munnlarry. 1994. Detecting salinity and soil nutrient deficiencies using spot satellite data. *Soil Sci.* 158(1)31–39, JUL 158: 31–39.
- Kantolic, AG; PI Giménez & EB De la Fuente. 2010. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Satorre EH; RL Benech Arnold; GA Slafer; EB De la Fuente; DJ Miralles; ME Otegui; & R Savin (eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Pp. 167–201. Editorial facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Sellers, PJ. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6: 1335–1372.
- Soil Science Society of America (ed.). 2001. *Glossary of soil science terms*. Madison, Wisconsin, EE.UU. 135 pp.
- Sonwalkar, M L; Fang & D Sun. 2010. Use of NDVI dataset for a GIS based analysis: A sample study of TAR Creek superfund site. *Ecol. Inform.* 5: 484–491.
- Szabolcs I. 1989. Salt-affected soils. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Lavado, RS & MA Taboada. 2017. Génesis y propiedades de los suelos halomórficos. In: Taleisnik E & RS Lavado

(eds.). Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo. Pp. 9–28. Buenos Aires, Argentina.

Velagaleti, R & S. Schweitzer. 1993. General effects of salt stress on growth and symbiotic nitrogen fixation in soybean. *Plant Crop Stress*: 461–471.

Wicke, B; E Smeets; V Dornburg; B Vashev; T Gaiser; W Turkenburg & A Faaij. 2011. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy Environ. Sci.* 4: 2669–2681.