

Mapeo espacial de la salinidad del suelo a través de sensores remotos. Estudio de caso norte de Tamaulipas*

Spatial mapping of soil salinity through remote sensing. Case study of northern Tamaulipas

Víctor Manuel Rodríguez Moreno^{1§}, José Ariel Ruíz Corral², José Saúl Padilla Ramírez¹ y Mario Marín Silva Serna³

¹Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes- Zacatecas, km 32.5 C. P. 20660, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. Tel: 01-800-088-2222, Ext. 82525.; (padilla.saul@inifap.gob.mx). ²Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera Libre, km 8. C. P. 47600, Tepatitlán-Lagos de Moreno. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Tel: 01 800-088-2222, Ext. 84503. (ruiz.ariel@inifap.gob.mx). ³Campo Experimental Río Bravo-INIFAP. 61 Carretera Matamoros-Reynosa, C. P. 88900, Río Bravo, Tamaulipas. Tel: 01-55-3871-8700 y 01-800-088- 2222, Ext. 83223. (silva.mario@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: rodriguez.victor@inifap.gob.mx.

Resumen

Conocer el estado del arte del contenido de sales en el suelo en los sistemas de producción bajo condiciones de riego a escala regional, es una necesidad cada vez mayor dada su tendencia a la alza. A través de un índice espectral obtenido de imágenes Landsat, se mapeó el dinamismo de la salinidad del suelo en un periodo de 20 años; se seleccionaron imágenes libres de nubes a intervalos regulares de 5 años. Los datos espectrales se obtuvieron de la razón de reflectancia, una medida con la que se obtiene el monto de energía radiante reflejada por la superficie de contacto. Se obtuvieron evidencias de la tendencia alcista en el contenido de sales en el suelo en la región de estudio. Así mismo, se identificaron algunas comunidades bióticas que durante el periodo analizado permanecieron estables en cuanto al contenido de sales en el suelo: mezquite y matorral. Los resultados sugieren delinear un plan estratégico de mejora para revertir la tendencia incremental del contenido de sales en el suelo que abarque los temas de: mejoras en los sistemas de drenaje, incorporación al suelo de los residuos de cosecha, uso de materiales tolerantes, y la reconversión productiva.

Palabras clave: índice de salinidad, prácticas agrícolas, sales en el suelo, SIG, mezquite.

Abstract

Knowing the state of the art of salt content in the soil in production systems under irrigation at regional level is a growing need given its upward trend. Through a spectral index derived from Landsat images, the dynamics of soil salinity over a period of 20 years was mapped; for this cloud-free images at regular intervals of five years were selected. Spectral data were obtained from reflectance ratio, a measure through which the amount of radiant energy reflected by surface contact is obtained. There was evidence on upward trend of salt content in the soil in the study area. Also identified some biotic communities that during the period under study remained stable regarding salt content in soil: mesquite and scrub; the results suggest to delineate a strategic improvement plan to revert the increasing trend of salt content in the soil that covers the topics of: improvements in drainage systems, incorporation of crop residues in the soil, use of tolerant materials, and productive reconversion.

Keywords: salinity index, salts in soil, GIS, mesquite, agricultural practices.

Introducción

La degradación del suelo a causa del contenido de sales tiene mayormente su origen en las actividades antropogénicas. La presencia de sales en el suelo es considerada un factor limitante para el rendimiento de los cultivos, especialmente en regiones áridas y semiáridas ó cercanas a la costa. Allbed y Kumar (2013) identifican dos categorías de suelos salinos: aquellos con salinidad primaria, la cual ocurre de manera natural y los de salinidad secundaria los cuáles son originados por la influencia de las actividades antropogénicas. El efecto de acumulación de sales en el suelo es potenciado por las prácticas de manejo del agua de riego, la calidad del agua, los sistemas de riego utilizados, la relación carga/recarga/extracción de agua del acuífero y la cercanía de las áreas agrícolas a la costa; los cambios en la cubierta del suelo, así como las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales, donde la conservación del suelo como recurso no es considerada como un componente del sistema de producción, dinamizan también el proceso de salinización. Estos son solo algunos ejemplos de cómo se favorecen los brotes de salinidad en las regiones agrícolas.

Adicionalmente a su efecto en los cultivos, la salinidad del suelo se ha convertido en un factor determinante que altera el patrón de integración espacial y temporal de las comunidades bióticas en los ecosistemas abiertos. De acuerdo con el US Salinity Staff Laboratory, aquellos suelos con una conductividad eléctrica (EC) >4 deciSiemens por metro (dSm^{-1}) a 25°C , porcentaje de sodio intercambiable (PSI) <15 y pH (reacción del suelo) <8.5 son suelos salinos (Richards, 1954). Para Shannon (1997) los suelos con $\text{EC} <4 \text{ dSm}^{-1}$ son considerados no-salinos; una EC de 4 a 16 dSm^{-1} son moderadamente salinos y $>16 \text{ dSm}^{-1}$ son altamente salinos.

La incorporación de sales al suelo ocurre de manera natural, por el intemperismo de las rocas y los minerales primarios, los cuáles se forman *in situ* o transportados por el agua o el viento (Shrestha y Farshad, 2008). Otras causas que influyen en el aumento de la salinidad en el suelo son: la topografía, el uso y manejo del agua, la salinidad del agua, los cambios de uso del suelo—especialmente en el bosque, el sobrepastoreo en las zonas pecuarias, y en general el desplazamiento de la cubierta arbustiva. Estos cambios ocasionan que la tabla de agua se eleve y acarree hacia la superficie agua salina sub superficial. Para las zonas costeras, su cercanía al mar agrega un componente adicional que promueve la subida de los componentes salinos hacia la superficie de la plataforma continental, las mejor descritas como intrusiones salinas. De

Introduction

Soil degradation due to salt content is mostly caused by anthropogenic activities. The presence of salts in the soil is considered a limiting factor for crop yields, especially in arid and semi-arid or near shore regions. Allbed and Kumar (2013) identified two categories of saline soils: those with primary salinity, which occurs naturally and high salinity which are caused by the influence of anthropogenic activities. The effect of salt accumulation in the soil is enhanced by irrigation management practices, water quality, irrigation systems used, the ratio charge / recharge / extraction of water from the aquifer and the proximity of agricultural areas to the coast; changes in land cover and agricultural, livestock and forestry practices, where soil conservation as resource is not considered as a component of the production system, also dynamism to salinization process. These are just some examples of how salinity outbreaks are favored in agricultural regions.

Additionally to its effect on crops, soil salinity has become a factor that alters the pattern of spatial and temporal integration of biotic communities in open ecosystems. According to US Salinity Staff Laboratory, those soils with electrical conductivity (EC) >4 deciSiemens per meter (dSm^{-1}) at 25°C , exchangeable sodium percentage (ESP) <15 and pH (soil reaction) <8.5 are saline soils (Richards, 1954). Shannon (1997) soils with $\text{EC} <4 \text{ dSm}^{-1}$ are considered non-saline; an EC from 4 to 16 dSm^{-1} are moderately saline and $>16 \text{ dSm}^{-1}$ are highly saline.

The addition of salts to the soil occurs naturally, by weathering and primary minerals, which are formed *in situ* or transported by water or wind (Shrestha and Farshad, 2008). Other causes that influence the raise of soil salinity are: the topography, water use and management, water salinity, land use change—especially in forest, overgrazing in livestock areas and overall the displacement of shrub cover. These changes cause water table to rise and will rise up to the surface saline subsurface water. For coastal areas, its proximity to the sea adds an additional component that promotes the raise of salt components to the surface of the continental shelf, described as the best saline intrusions. According to the USGS, naturally the movement of subsurface waters into the sea prevents sea water to reach coastal aquifers; however, the abuse in pumping water extraction practices, especially for industrial, mining and agricultural supply, break this balance and form transition

acuerdo con el USGS, de manera natural el movimiento de las aguas sub superficiales hacia el mar previene que el agua de mar alcance los acuíferos costeros; sin embargo, el abuso en las prácticas de extracción del agua por bombeo, especialmente para fines de abasto industrial, minero y agrícola, rompen este equilibrio y se forman zonas de transición donde se mezclan tanto el agua de mar como las aguas sub superficiales. Los efectos de la aparición de estas zonas es que “brotan” hacia la superficie mayores cantidades de compuestos salinos, se contaminen los acuíferos, y se afecte la calidad del agua por un desbalance en la estequiometría.

Las sales en el suelo se caracterizan por la formación de costras blancas en la superficie del suelo. Cloruro de sodio (NaCl), sulfato de sodio, cloruro de calcio (CaCl₂), yeso (CaSO₄), sulfato de magnesio, y cloruro de potasio, son las sales más comunes, reducen la tasa de germinación (Igartua *et al.*, 1994), afectan el desarrollo de los cultivos (Maiti *et al.*, 1994), su rendimiento (Macharia *et al.*, 1994), la calidad del suelo y del agua, y eventualmente resulta en la erosión del sustrato y en la degradación del terreno (Rhoades y Loveday, 1990; Zhu, 2001), restringe el desarrollo radicular y finalmente causa la muerte de la planta. Según Almodares *et al.* (2008a) los efectos inhibitorios de la salinidad sobre el crecimiento de la planta incluyen: a) toxicidad de iones; b) influencia osmótica; c) desbalance nutricional; el efecto conjunto de estos factores en la planta es la reducción de la eficiencia fotosintética de la planta y la disminución de la producción de biomasa. Los mayores daños por salinidad en el suelo se observan mayormente en la plántula durante la etapa de emergencia, más que en ninguna otra etapa de desarrollo del cultivo (Macharia *et al.*, 1994).

Tradicionalmente, la salinidad del suelo se ha medido a través de muestras colectadas en el terreno o a través de plantas indicadoras de salinidad. Sin embargo, esta técnica implica un alto costo económico. Las muestras son procesadas en el laboratorio de suelos para obtener el valor de EC. Los índices espectrales derivados de la razón de reflectancia son obtenidos por métodos indirectos, contrastando las bandas espectrales, y representan una opción al método directo para obtener indicadores del contenido de sales en el suelo. Ghabour y Daels (1993) mencionan que la obtención de datos de salinidad del suelo conlleva una mayor eficiencia y economía cuando se utilizan los datos de reflectancia obtenidos por percepción remota. Al respecto se puede mencionar que por su resolución espacial, temporal y radiométrica, obtener indicadores de la salinidad del suelo de las imágenes de satélite, requiere de menos tiempo, las

zones where both seawater and sub-surface waters mix. The effects of the appearance of these areas is that "sprout" towards the surface greater amounts of salt compounds, polluting groundwater and affecting water quality by an imbalance in stoichiometry.

The salts in the soil are characterized by the formation of white crust on soil surface. Sodium chloride (NaCl), sodium sulfate, calcium chloride (CaCl₂), gypsum (CaSO₄), magnesium sulfate and potassium chloride, are the most common salts, reduce the germination rate (Igartua *et al.*, 1994), affecting crop development (Maiti *et al.*, 1994), yield (Macharia *et al.*, 1994), soil and water quality, and eventually results in soil erosion and land degradation (Rhoades and Loveday, 1990; Zhu, 2001) restricts root development and eventually kills the plant. According to Almodares *et al.* (2008a) the inhibitory effects of salinity on plant growth include: a) ion toxicity; b) osmotic influence; and c) nutritional imbalance; the joint effect of these factors on the plant is the reduction of photosynthetic plant efficiency and decreasing biomass production. The greatest damage by soil salinity is observed mostly in seedling during the emergency stage, more than in any other stage of crop development (Macharia *et al.*, 1994).

Traditionally, soil salinity has been measured through samples collected in the field or through plant salinity indicators. However, this technique involves high economic cost. The samples are processed in soil laboratory to obtain EC value. The spectral indices derived from the reflectance ratio are obtained by indirect methods, contrasting spectral bands, and represent an alternative to the direct method to obtain indicators of salt content in the soil. Ghabour and Daels (1993) mention that data collection of soil salinity leads to greater efficiency and economy when using reflectance data obtained by remote sensing. In this regard it can be mentioned that by their spatial, temporal and radiometric resolution, to obtain soil salinity indicators from satellite images, requires less time, the images are taken at regular intervals without interruption, and allow deriving rapid indicators of soil salinity conditions at pixel scale.

Based on contrasting bands from the electromagnetic spectrum of satellite images, have been published a large number of spectral indices that track vegetation dynamics. Some of the most documented in literature are normalized difference vegetation index (NDVI): Rouse (1973) and soil adjusted vegetation index (SAVI): Huete (1988). Similarly, Khan and Abbas (2007) proposed two spectral indices for

imágenes se toman a intervalos regulares sin interrupción, y permiten derivar indicadores rápidos de la condición de salinidad en el suelo a escala de pixel.

Con base en el contraste de bandas del espectro electromagnético de las imágenes de satélite, se han publicado una cantidad importante de índices espectrales que dan seguimiento al dinamismo de la vegetación. Algunos de los más documentados en la literatura son normalized difference vegetation index (ndvi): rouse (1973) y soil adjusted vegetation index (SAVI): Huete (1988). Similarmente, Khan y Abbas (2007), propusieron dos índices espectrales para el mapeo y detección de la salinidad del suelo, normalized difference salinity index (NDSI) y salinity index (SI). Entre éstos, mencionan que el SI arrojó los resultados más aceptables en identificar las diferentes clases de sales en el suelo.

En la presente propuesta se aborda la problemática inherente a utilizar índices espectrales para mapear el contenido de sales en el suelo y evidenciar su evolución espacial y temporal. Para esto se ha seleccionado una región geográfica que contrasta por su buen número de clases en el uso del suelo: agrícola de riego, agrícola de temporal, cuerpos de agua y ecosistemas abiertos. Adicionalmente, aunado a la circunstancia de utilizar un índice espectral como indicador válido para evidenciar el dinamismo del contenido de sales en el suelo durante el periodo de estudio, se discute sobre su utilidad así como las limitantes en su uso e interpretación si se toma a consideración el origen de los datos.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se ubica al norte del estado de Tamaulipas (Figura 1). Cabe resaltar la importancia socioeconómica de esta región, donde el cultivo de sorgo es la principal actividad agrícola, y que según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014), concentra 40.3% del volumen de la producción nacional de sorgo y 38.2% del valor generado en 2014 (~\$7.5 Millones de pesos).

El origen de los índices de salinidad son imágenes de satélite, Landsat 5 TM (Thematic Mapper), las más antiguas y Landsat 8 OLI (Operational Land Imager), la más reciente de las misiones Landsat. Por su acervo y el tiempo de

mapping and detection of soil salinity, normalized difference salinity index (NDSI) and salinity index (SI). Among these, mention that the SI gave the most acceptable results to identify the different types of salts in the soil.

This proposal addresses inherent problems when using spectral indices to map salt content in soil and show their spatial and temporal evolution. To do so have been selected a geographic region that contrasts for its good number of classes in land use: agricultural irrigation, rainfed, water bodies and open ecosystems. Additionally, coupled with the fact of using a spectral index as a valid indicator to show the dynamism of the salt content in the soil during the study period, it discusses their usefulness as well as the limitations on their use and interpretation if taken for consideration the origin of the data.

Materials and methods

Description of the study area

The study area is located up north in the state of Tamaulipas (Figure 1). It is worth noting the economic importance of this region, where sorghum is the main agricultural activity, and according to the Agrifood and Fisheries Information Service (SIAP, 2014), concentrated 40.3% of domestic production of sorghum and 38.2% of the generated value in 2014 (~\$ 7.5 million pesos).

The origin of salinity indices are satellite imagery, Landsat 5, Thematic Mapper (TM), the oldest and Landsat 8, Operational Land Imager (OLI), the latest of Landsat missions. For its collection and time recording, the time series of data from the Landsat series is the longest of the observation missions of the land. The study period included 20 years from 1995 to 2015. It was decided to use an image taken at a regular interval every 5 years. For its optical origin, Landsat images are influenced by the presence of clouds, therefore selected images with less than 5% of cloudiness. The dates of the images were: April 17, 1995, May 19, 1995, June 6, 2000, November 22, 2005 and November 2, 2015; the first four dates are from Landsat 5 TM and the last from Landsat 8 OLI.

Landsat images have a spatial resolution of 30m, temporal resolution 16-day and coverage area of 185 km. Each image represents a set of data of ~38 M pixels. Before

registro, la serie histórica de datos de la serie Landsat es la más longeva de las misiones de observación del terreno. El periodo de estudio comprendió 20 años, de 1995 a 2015. Se eligió utilizar una imagen tomada a un intervalo regular de cada 5 años. Por su origen óptico, las imágenes Landsat están influenciadas por la presencia de nubes, por lo cual se seleccionaron imágenes con menos de 5% de nubosidad. Las fechas de las imágenes fueron: 17 de abril de 1995, 19 de mayo de 1995, 6 de junio de 2000, 22 de noviembre de 2005 y 2 de noviembre de 2015; las primeras cuatro fechas corresponden al sensor Landsat 5 TM y la última al sensor Landsat 8 OLI.

Las imágenes Landsat tienen una resolución espacial de 30 m, resolución temporal de 16 días y una cobertura del terreno de 185 km. Cada imagen representa un conjunto de datos de ~38 M de píxeles. Antes de calcular los índices de salinidad, todas las imágenes fueron tratadas para corregir los efectos atmosférico, radiométrico, topográfico y para superficie iluminada. Los índices de salinidad se calcularon con base en el estimado de la razón de reflectancia. La radianza espectral es el flujo radiante emitido, reflejado, transmitido o recibido por una superficie; la reflectancia espectral es la porción de la energía incidente que es reflejada por la superficie de contacto. Se mide en función de la longitud de onda (Ec. 1 y Ec. 3, respectivamente). Esta razón de reflectancia se obtiene en dos etapas: 1) conversión de los valores de DN (Digital Number) a valores de radianza espectral; y 2) conversión del valor de radianza espectral a reflectancia espectral en el tope de la atmósfera (Top of Atmosphere).

$$L_{\lambda} = \text{gain} * \text{DN} + \text{bias} \quad 1)$$

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * \frac{d^2}{\text{ESUN}_{\lambda}} * \cos\theta_s \quad 2)$$

$$L_{\lambda} = M_L Q_{\text{cal}} + A_L \quad 3)$$

$$\rho_{\lambda}' = M_p Q_{\text{cal}} + A_p \quad 4)$$

$$\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}' / \sin(\theta_{\text{SE}}) \quad 5)$$

De la ecuación 1, gain es la pendiente y bias es la ordenada al origen de la ecuación de conversión radianza espectral/DN; DN es el número digital. De la ecuación 2, se obtiene el estimado de reflectancia al tope de la atmósfera; π es Sr (hipótesis del blanco lambertino); L_{λ} es el producto de la ecuación 1; d^2 es la distancia de la Tierra al Sol en unidades astronómicas; ESUN_{λ} es la irradianza solar espectral al tope de la atmósfera; θ_s es el ángulo cenital solar. Esta ecuación

calculating salinity indices, all images were treated to correct atmospheric, radiometric, topographic effects and for illuminated surface. Salinity indices were calculated based on estimated reflectance ratio. Spectral radiance is the radiant flux emitted, reflected, transmitted or received by a surface; the spectral reflectance is the portion of incident energy that is reflected from the contact surface. It is measured as a function of wavelength (Eq. 1 and Eq. 3, respectively). Therefore reflectance is obtained in two stages: 1) conversion of DN values (digital number) to spectral radiance values; and; 2) conversion of spectral radiance values to spectral reflectance on the top of atmosphere (Top of Atmosphere).

$$L_{\lambda} = \text{gain} * \text{DN} + \text{bias} \quad 1)$$

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * \frac{d^2}{\text{ESUN}_{\lambda}} * \cos\theta_s \quad 2)$$

$$L_{\lambda} = M_L Q_{\text{cal}} + A_L \quad 3)$$

$$\rho_{\lambda}' = M_p Q_{\text{cal}} + A_p \quad 4)$$

$$\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}' / \sin(\theta_{\text{SE}}) \quad 5)$$

From Eq 1, gain is the slope and bias is the intercept of the equation of spectral radiance conversion/DN; DN is the digital number. From Eq 2, the estimated reflectance at top of the atmosphere is obtained; π is Sr (white Lambertino hypothesis); L_{λ} is the product from Eq. 1; d^2 is the distance from Earth to the Sun in astronomical units; ESUN_{λ} is solar spectral irradiance at top of atmosphere; θ_s is the solar zenith angle. This equation is for Landsat 5 TM images. From Eq. 4, the reflectance value at top of atmosphere is obtained; M_p is the rescaling multiplicative factor and is specific for each band; Q_{cal} is the DN value; A_p is the additive rescaling factor and it specific for each band. Equation 5 is a correction equation of reflectance by the solar local angle. ρ_{λ}' is the product from Eq. 4; θ_{SE} is the local elevation angle of the sun; is located at the center of the scene.

Although the result from the equations used is an estimate of the reflectance value, it must perform the calculations separately as each source sensor has its own setting parameters. Eq. 1 and 2 correspond to data structure of 8-bit from Landsat 5 TM images, while Eq. 3, 4 and 5 are suitable for data processing at 16 bits from Landsat 8 OLI.

Salinity index was obtained according to equation 6.

$$\text{SI} = \sqrt{\text{blue} * \text{red}} \quad 6)$$

es para las imágenes Landsat 5 TM. De la ecuación 4, se obtiene el valor de reflectancia en el tope de la atmósfera.; M_p es el factor de re-escalamiento multiplicativo y es específico para cada banda; Q_{cal} es el valor de DN; A_p , es el factor de re-escalamiento aditivo, específico para cada banda. La ecuación 5, es la ecuación de corrección de la reflectancia por el ángulo local solar. $\rho\lambda'$ es el producto de la ecuación 4; θ_{SE} es el ángulo local de elevación del sol; se ubica al centro de la escena.

Aunque el resultado de las ecuaciones utilizadas es un estimado del valor de reflectancia, se deben de realizar los cálculos por separado pues cada sensor de origen tiene sus propios parámetros de ajuste. Las ecuación 1 y 2, corresponden a la estructura de datos de 8 bits de las imágenes Landsat 5 TM, mientras que las ecuación 3, 4 y 5 son apropiadas para el procesamiento de los datos a 16 bits del sistema Landsat 8 OLI.

El índice de salinidad, se obtuvo según la ecuación 6.

$$SI = \sqrt{\text{azul} * \text{rojo}} \quad 6)$$

De la ecuación 6, SI es el valor del índice; azul es la banda azul (0.45-0.51 μm) y rojo (0.64-0.67 μm) es la región del rojo del espectro electromagnético.

Como alternativa a los intervalos de clase propuestos por Shannon (1997), para categorizar la salinidad en el suelo, se proponen los siguientes intervalos: < 16 dSm^{-1} , moderadamente salino; <16 - 20> dSm^{-1} , salino; >20 dSm^{-1} , altamente salino.

Análisis de datos

Para el análisis estadístico de los datos se obtuvo una muestra representativa de 1 800 ha del terreno, equivalente a 20 000 pares coordenados, los cuáles son el centroide de igual número de píxeles de la imagen Landsat. Como máscara de análisis, se utilizó el vector de uso del suelo serie VI del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Debido a la amplitud en el número de clases, el número de estratos se redujo a diez: agricultura de riego (riego), agricultura de temporal (temporal), pastizal (pastizal), suelo desnudo (s_desnudo), matorral (matorral), mezquite (mezquite), duna (duna), cuerpo de agua (cpo_agua), asentamientos humanos (ah), y vegetación halófito (v_halófito).

From Eq 6, SI is the index value; blue is the blue band (0.45-0.51 μm) and red (0.64 to 0.67 μm) is the red region from the electromagnetic spectrum.

As alternative to class intervals proposed by Shannon (1997), to categorize soil salinity, the following intervals are proposed: <16 dSm^{-1} , moderately saline; <16-20> dSm^{-1} saline; > 20 dSm^{-1} , highly saline.

Data analysis

For statistical analysis of the data a representative sample of 1 800 ha of land, equivalent to 20 000 coordinate pairs, which are the centroid of an equal number of pixels of Landsat image were obtained. As mask analysis, was used the land use serial vector VI from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI). Due to the amplitude in class number, the number of strata was reduced to ten: irrigated (riego), rainfed (temporal), grassland (pastizal), bare soil (s_desnudo), scrub (matorral), mesquite (mezquite), dune (duna), body water (cpo_agua), human settlements (ah) and halophyte vegetation (v_halofita).

Statistical analysis was performed using ANOVA (analysis of variance) single factor; to explore differences between groups Tukey 0.05 was used. This is a test that can be used when required to compare each group with the rest and the number of groups is high (more than 6).

Results and discussion

Mapping soil salinity

Figure 1 shows the sequence of thematic maps showing spatial and temporal variation in the study area according to salinity index.

To highlight from Figure 1, images A and B correspond to the beginning of the study (1995) and as shown in Figure 2 (zooming), salt content in the soil decreases considerably from one date to another in agriculture land; it shows that natural vegetation keeps its salinity level. The difference between one image and another is one month and it seems that the crops have been removed from ground cover and it is evident the decline of soil salinity value; this can be distinguished by the predominance of orange tones in the

El análisis estadístico se realizó aplicando la técnica de ANOVA (Analysis of Variance) de un solo factor. Para explorar las diferencias entre grupos se utilizó la prueba de Tukey al 0.05. Esta es una prueba que se puede utilizar cuando se quiere comparar cada grupo con todos los demás y el número de grupos es alto (más de 6).

Resultados y discusión

Mapeo de la salinidad del suelo

En la Figura 1 se muestra la secuencia de mapas temáticos que muestran la variación espacial y temporal de la región de estudio según el índice de salinidad.

Para resaltar de la Figura 1, las imágenes A y B corresponden al inicio del estudio (1995) y como se observa en la Figura 2 (acercamiento), el contenido de sales en el suelo disminuye considerablemente de una fecha a otra en el área agrícola; se observa que la vegetación natural mantiene su nivel de salinidad. La diferencia entre una imagen y otra es de un mes calendario y pareciera ser que los cultivos ya han sido removidos de la cubierta del suelo y es evidente la disminución en el valor de la salinidad en el suelo; esto se puede diferenciar por el predominio en la imagen de tonos naranjas. La presencia de valores extremos en la imagen (tonos azulados) pueden considerarse aberrantes (datos poco plausibles) y pueden atribuirse principalmente a la presencia de nubosidad.

Las figuras E y F de la Figura. 1 corresponden a la última fecha de la serie de datos (noviembre de 2015). Se observa una mejor definición en el uso del suelo, lo cual facilita el análisis fotointerpretativo de la imagen. En el Cuadro 1 se muestran los datos descriptivos de la muestra de datos.

Del Cuadro 1, los encabezados de las columnas son: n , es el número de pares coordenados por estrato de uso del suelo; A01, es la fecha de toma de la imagen, el 17 de abril de 1995; A02, el 19 de mayo de 1995; X02, el 6 de junio de 2000; C00, el 22 de noviembre de 2005; y OLI, el 2 de noviembre de 2015. El valor presentado corresponde al valor promedio estimado del contenido de sales en el suelo (dSm^{-1}). Por conveniencia, de aquí en adelante, a las fechas de toma de la imagen se les referirá con estos acrónimos.

image. The presence of extreme values in the image (blue tones) can be considered aberrant (implausible data) and can be attributed to the presence of clouds.

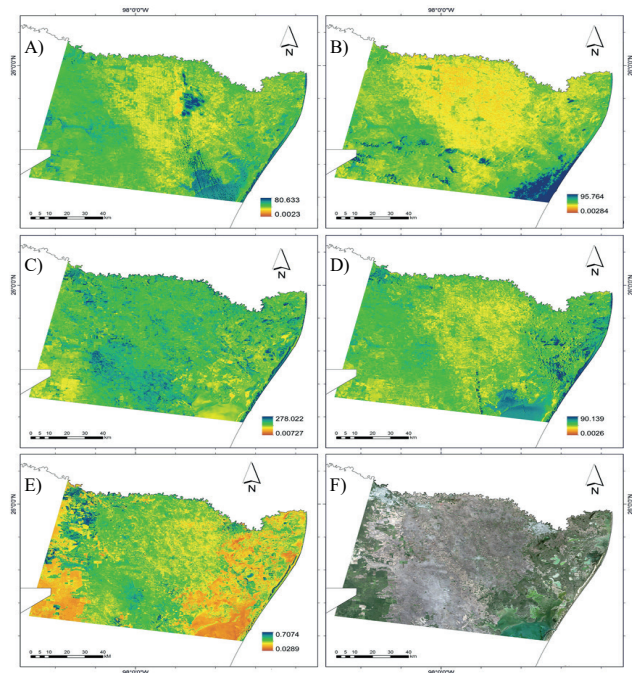


Figura 1. Dinamismo del índice de salinidad (SI) en la región de estudio por fecha de imagen. A: 17 de abril de 1995; B: 19 de mayo de 1995; C: 6 de junio de 2000; D: 22 de noviembre de 2005; y E: 2 de noviembre de 2015; la imagen F, corresponde a la composición de bandas de color verdadero.

Figure 1. Dynamism from salinity index (SI) in the study area by imagedate; A: April 17, 1995; B: May 19, 1995; C: June 6, 2000; D: November 22, 2005; and E: November 2, 2015; F image corresponds to band composition of true color.

Figures E and F from Figure 1 correspond to the last date from the data series (November 2015). A better definition in land use is observed, which facilitates photo interpretation analysis of the image. Table 1 shows the descriptive data of the sample data is displayed.

From Table 1, the column headings are: n is the number of coordinate pairs per stratum of land use; A01 is the image date, April 17, 1995; A02, May 19, 1995; X02, June 6, 2000; C00, November 22, 2005; and OLI, November 02, 2015. The value presented corresponds to the estimated average value of salt content in the soil (dSm^{-1}). For convenience, hereinafter, the image date will be referred with these acronyms.

An important aspect to observe from the data series was aimed at identifying land use substrate where changes in salinity condition were more evident (Figure 2).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de la muestra de datos.
Table 1. Descriptive statistics of sample data.

Uso del suelo	n	Fechas de toma de las imágenes				
		A01	A02	X02	C00	OLI
Riego	6345	20.278	22.975	23.991	70.084	89.775
Temporal	5730	23.424	31.026	27.728	74.022	96.270
Pastizal	2017	24.329	32.168	28.954	59.191	76.974
S_desnudo	282	30.091	48.005	40.707	86.193	90.985
Matorral	748	21.487	28.855	24.506	50.482	60.764
Duna	107	25.462	49.057	33.275	78.700	96.146
Cpo agua	1733	29.457	42.625	36.500	59.458	64.567
Ah	610	24.581	30.756	31.773	76.630	105.150
Mezquite	217	21.956	30.316	23.877	48.707	60.547
V_halófila	2211	22.797	30.305	29.436	62.605	72.835

Un aspecto importante a observar de la serie de datos fue dirigido a identificar aquel sustrato del uso del suelo donde los cambios en su condición de salinidad fueran más evidentes (Figura 2).

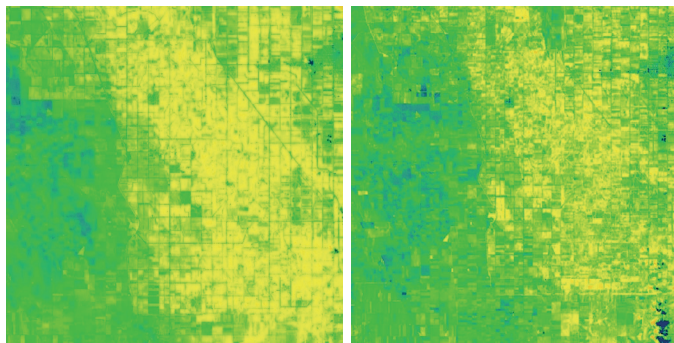


Figura 2. Acercamiento a las imágenes de SI que representan la condición inicial del área de estudio.

Figure 2. Close up to SI images representing the initial condition of the study area.

El aspecto más notorio de la Figura 3 es la desaparición de las clases “moderado” y “salino”, prácticamente desde 1995, fecha desde donde fueron disminuyendo paulatinamente hasta desaparecer en 2015. Se observa que el sustrato con mayor dinamismo es el agrícola, independientemente si es de riego o temporal. Otro aspecto que destaca es la consistencia en los valores del SI de una imagen a otra y hasta la de fecha más reciente (OLI). Bajo esta perspectiva, se identifica que es en los sustratos sin vegetación (un, s_desnudo, y ah), y el de pastizal, donde las variaciones no fueron tan notables.

The most notable aspect from Figure 3 is the disappearance of the "moderate" and "saline" class, virtually since 1995, starting date when gradually decreased till disappearance in 2015. It is noted that the substrate is higher dynamism is agricultural independently if it is under irrigation or rainfed. Another aspect that stands out is the consistency in SI values of one image to another till the most recent (OLI). From this perspective, it is identified that in substrates without vegetation (dunas, s_desnudo, and ah), and pastizal, where variations were not so noticeable.

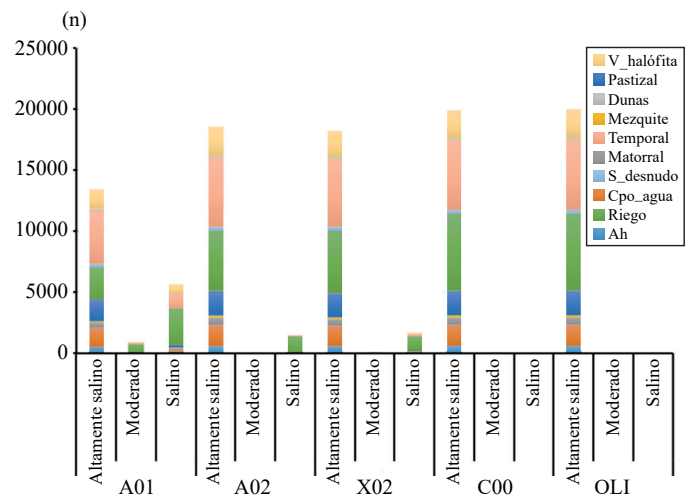


Figura 3. Número de píxeles de la muestra con cambios en la ubicación del estrato de uso del suelo según el valor del índice SI.

Figure 3. Number of pixels of the sample with changes in location of land use substrate according to the SI index value.

La tendencia que sugieren los datos es un incremento en el contenido de sales en el suelo. Esto es un punto de alerta en especial para las zonas agrícolas de riego y temporal. De acuerdo con lo mencionado por Fernández-Mata *et al.* (2014) el incremento de sales en el suelo limita la actividad agrícola en grandes extensiones de tierra, causando una disminución de la capacidad de los suelos y una baja en los rendimientos de los cultivos. Es en este sentido que productores, científicos y tomadores de decisiones debieran conjuntar esfuerzos y desarrollar propuestas de investigación donde proyecten un programa de medidas de mitigación para revertir esta tendencia. La mayor preocupación es que mientras más salino el suelo las plantas son menos capaces de tomar el agua. La razón es simple, en la medida que los niveles de salinidad del suelo son altos, el agua presente en las raíces se regresa al suelo y la planta no tiene capacidad de absorberla; eventualmente la planta que creció se marchitará y morirá, sin importar la cantidad de agua que se le suministre.

Análisis de datos

La prueba de ANOVA resultó significativa ($p < 0.01$) para el uso del suelo. En la Figura 4 se muestra la distribución de medias por fecha de muestreo por estrato de uso del suelo.

De la Figura 4, puede destacarse el aumento explosivo en la salinidad del suelo del año 2000 a 2015 en todos los estratos. Tres puntos a destacar de la gráfica son de importancia: 1) el sustrato agrícola (riego y temporal), se observa con el rango de crecimiento en salinidad más alto; esto se puede interpretar como propio de las prácticas aplicadas por los productores, inherentes al sistema de producción; y 2) la estabilidad de algunos usos/ocupación de suelo en los que no obstante el incremento en la salinidad del suelo, se mantienen estables; estos son: matorral, pastizal y mezquite. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de la prueba de grupos homogéneos de Tukey (0.05).

Del Cuadro 2, consistentemente los estratos donde se observó el mayor contenido de sales, son aquellos que carecen de vegetación. Los valores más bajos se encontraron para los estratos “riego” (en abril y mayo de 1995) y “mezquite” (en abril de 1995). Como se mencionó líneas arriba, el uso y manejo del agua y los paquetes tecnológicos podrían ser la causa que explique estos valores en la clase “riego”. Para el caso del mezquite, es notable el paralelismo con el sustrato “matorral” en el contenido de sales en el suelo. Jarrel y Virginia (1984) reportaron que los sistemas radicales del mezquite están bien adaptados para crecer en áreas donde el origen del

The trend that data suggests is an increase of salt content in the soil. This is a warning point especially for agricultural areas under irrigation and rainfed. According to Fernández-Mata *et al.* (2014) the increase of salts in the soil limits agricultural activity in large land extension causing a decrease in soil capacity and low crop yields; in this regard producers, scientists and decision makers should join efforts and develop research proposals projecting a program for mitigation measures to reverse this trend. The biggest concern is that the more saline the soil plants are less capable to absorb water. The reason is simple, as salinity levels in the soil are high, the water present in the roots returns to the ground and the plant does not have the capacity to absorb it; grown plants will eventually wither and die, regardless of the amount of water being supplied.

Data analysis

ANOVA test was significant ($p < 0.01$) for land use. Figure 4 shows the distribution of means by sampling date per land use stratum.

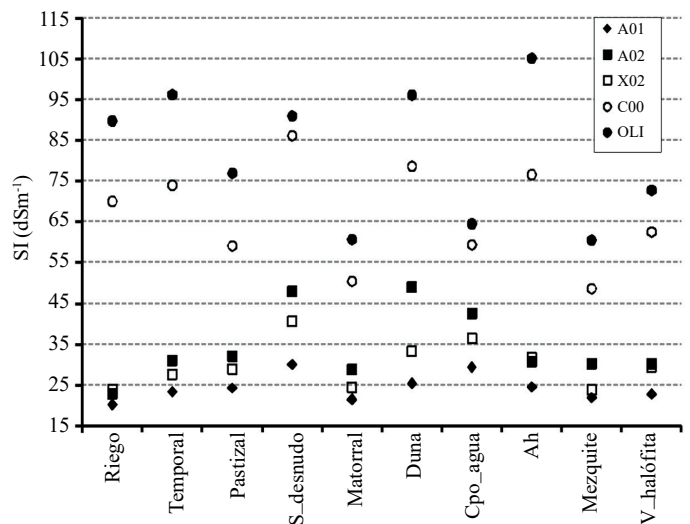


Figura 4. La salinidad del suelo por uso del suelo durante el periodo de estudio.

Figure 4. Soil salinity by land use during the study period.

In Figure 4, can be highlighted the explosive increase in soil salinity from 2000 to 2015 in all strata. Three points to highlight from the graph are: 1) agricultural substrate (irrigation and rainfed) shows the growth rate in higher salinity; this can be interpreted as own practices applied by producers, inherent to the production system; and 2) the stability of some land uses in those despite the increase in soil salinity, remain stable; these are: scrub, grassland and mesquite. Table 2 shows the results from the homogeneous groups test Tukey (0.05).

agua es principalmente subterráneo. Mencionan además que el mezquite es capaz de crecer y florecer en suelos más salinos que 20 dSm^{-1} y que sus raíces puede aprovechar aguas salinas de hasta 28 dSm^{-1} . Para la comunidad de matorral, numerosos reportes destacan en general que esta comunidad biótica es tolerante a la alta salinidad en el agua y a suelos ricos en sales. Nuestros resultados parecen apoyar estas aseveraciones y sugieren que estas comunidades bióticas pueden sobrevivir a condiciones más salinas de las que reportan estos autores. Sin embargo, nuestro estudio no es concluyente y demanda más atención con el planteamiento de nuevas preguntas de investigación que incluyan la georreferenciación de áreas específicas y espacialmente continuas de sitios con estas comunidades bióticas.

Conclusiones

A través de un índice espectral se demostró el patrón de variación espacial y temporal de la salinidad del suelo en una región multi-fragmentada por la frontera espacial del uso del suelo. Con las técnicas de análisis de datos aplicadas se obtuvieron evidencias de que la salinidad va en aumento en todas las clases de uso/ocupación del suelo. De aquí la conveniencia de llevar a efecto la delimitación de un plan estratégico de mitigación con el que se revierta la tendencia de aumento de la salinidad del suelo, pues esta condición pone en riesgo la producción agrícola, la conservación de suelos y en general la sustentabilidad de los ecosistemas. Los grandes tópicos que este plan estratégico debe contemplar son: promoción de mejoras en los sistemas de drenaje, impulso entre los productores para la incorporación al suelo de los residuos de cosecha, el uso de especies tolerantes a sequía, y la reconversión productiva.

Agradecimientos

Los autores desean manifestar su agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo técnico y financiero recibido.

Literatura citada

Allbed, A. and Kumar, L. 2013. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in remote sensing*. 2:373-385.

Cuadro 2. Prueba de Tukey para grupos homogéneos sobre la muestra de datos.

Table 2. Tukey test for homogeneous groups on sample data.

USUE	A01	A02	X02	C00	OLI
Tiego	20.28 d	22.98 e	23.99 a	70.08 e	89.77 c
Temporal	23.42 e	31.03 b	27.73 d	74.02 f	96.27 e
Matorral	21.49 b	28.86 c	24.51 a	50.48 a	60.76 a
Mezquite	21.96 bc	30.32 abc	23.88 a	48.71 a	60.55 ab
V_halófito	22.80 c	30.30 a	29.44 b	62.61 d	72.83 f
Pastizal	24.33 a	32.17 f	28.95 b	59.19 b	76.97 g
Ah	24.58 a	30.76 ab	31.77 c	76.63 c	<i>105.15</i> h
Duna	25.46 a	<u>49.06</u> d	33.27 c	78.70 c	96.15 de
Cpo agua	29.46 d	42.63 g	36.50 e	59.46 b	64.57 b
S_desnudo	<u>30.09</u> d	48.00 d	<u>40.71</u> f	<u>86.19</u> g	90.98 cd

El valor mostrado es el promedio. Los caracteres en negritas corresponden con el valor mínimo y los subrayados en itálicas al valor máximo de SI (dSm^{-1}). El número de grupos significativamente diferentes es el que se reporta en la fila debajo del valor de SI, deben leerse en sentido vertical, por fecha de la imagen.

From Table 2, specifically strata where higher salt content was observed are those lacking vegetation. The lowest values were found for strata "riego" (in April and May 1995) and "mesquite" (in April 1995). As mentioned above, water use and management and technological packages could be the cause explaining these values in "irrigation" class. For mesquite, it is remarkable the parallelism with the substrate "matorral" in salt content in the soil. Jarrell and Virginia (1984) reported that mesquite root systems are well adapted to grow in areas where water source is mostly underground. Also mention that mesquite is able to grow and flourish in saline soils higher than 20 dSm^{-1} and its roots can take saline water of up to 28 dSm^{-1} . For scrub community, numerous reports generally highlight that this biotic community is tolerant to high salinity in water and saline soils. Our results seem to support these findings and suggest that these biotic communities can survive to more saline conditions than those reported by these authors. However, our study is not conclusive and demands more attention with the approach of new research questions that include georeferenced of specific areas and spatially continuous of sites with these biotic communities.

- Igartua, E.; Gracia, M. P. and Lasa, J. M. 1994. Characterization and genetic control of germination, emergence responses of grain sorghum to salinity. *Euphytica*. 76(3):185-193.
- Maiti, R. K. and de la Rosa, L. A. 1994. Evaluation of several sorghum genotypes for salinity tolerance. *International Sorghum and Millets Newsletter*, 35:121.
- Macharia, J. M.; Kamau, J.; Gituanja, J. N. and Matu, E. W. 1994. Effects of sodium salinity on seed germination and seedling root and shoot extension of four sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] cultivars. *International Sorghum and Millets Newsletter*. 35:124-125.
- Richards, L. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Soil Science*. 78(2):154.
- Rhoades, J. and Loveday, J. 1990. Salinity in irrigated agriculture. *In: Stewart, B. A. and Nielsen, D. R. (Eds.). American Society of Civil Engineers, Irrigation of Agricultural Crops*. 30:1089-1142.
- Shannon, M.C. 1997. Adaptation of plants to salinity. *Advances in Agronomy*. 60:75-120.
- Shrestha, D. P. and Farshad, A. 2008. Chapter 13. Mapping salinity hazard: an integrated application of remote sensing and modeling-based techniques. *In: Metternicht, G. and Zinck, J. A. (Eds.). Remote sensing of soil salinization: Impact on Land Management*, CRC Press, Boca Raton, 257 p.
- Zhu, J. K. 2001. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*. 6(2):66-71.
- Almodares, A.; Hadi, M. R. and Dosti, B. 2008a. The effects of salt stress on growth parameters and carbohydrates contents in sweet sorghum. *Res. J. Environ. Sci.* 2(4):298-304.
- Ghabour, T. and Daels, L. 1993. Mapping and monitoring of soil salinity of ISSN. *Egyptian J. Soil Sci.* 33(4):355-370.
- Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Schell, J. A. and Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*. NASA SP-351.1:309-317.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295-309.

Conclusions

Through a spectral index it was proven the pattern of spatial and temporal variation of soil salinity in a multi-fragmented region by the spatial frontier of land use. With the techniques of data analysis applied obtained evidence that salinity is increasing in all land use classes. Hence the desirability of carrying the delineation of a strategic mitigation plan in which considers reversing the trend of increasing soil salinity, as this condition puts at risk agricultural production, soil conservation and overall sustainability of ecosystem. The major topics that this strategic plan should include are: promoting improved drainage systems, promotion among producers for incorporation of crop residues into the soil, use of drought tolerant species, and productive reconversion.

End of the English version



- Khan, S. and Abbas, A. 2007. Remote sensing based modelling applications in land and water management: using remote sensing for appraisal of irrigated soil salinity. *MODSIM 2007. International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. 343 p.
- Fernández-Mata, I.; Rodríguez-Gamiño, M. L.; López-Blanco, J. y Vela-Correa, G. 2014. Dinámica de la salinidad de los suelos. *Revista Digital E-BIOS*. 5(1):26-35.
- Jarrel, W. M. y Virginia, R. A. 1984. Salto tolerance of mesquite. *California Agriculture*. 87 p.