

ANÁLISIS FRACTAL DE LA REFLECTANCIA DE LOS SUELOS SALINOS

REFLECTANCE FRACTAL ANALYSIS OF SALINE SOILS

Yolanda Giron-Rios^{1*}, Klaudia Oleschko-Lutkova², Jean-Francois Parrot³, J. Manuel Hernández-Alcantara⁴,
Enrique Camarillo García⁴, J. Jesús Velázquez-García⁵

¹Instituto de Geología. ³Instituto de Geografía. ⁴Instituto de Física. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica s/n. Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Apartado Postal 70296, 04510 México D.F. (yolandagiry@hotmail.com), (jfparrrot@hotmail.com), (josemh@fisica.unam.mx), (cgarcia@fisica.unam.mx). ²Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Juriquilla. Apartado Postal 1-742, 76001, Querétaro, Querétaro, México. (olechko@servidor.unam.mx). ⁵Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Producción Sostenible. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 58920. Álvaro Obregón, Michoacán, México. (velazquez.jaime@inifap.gob.mx).

RESUMEN

La variabilidad en el espacio de la salinidad del suelo ha sido documentada en diversos estudios. La reflectancia es una variable fundamental de ellos. En este trabajo se propone un método alternativo para el análisis de la salinidad mediante los datos multiescalares de la reflectancia. El método propuesto extrae la información para describir la estructura del suelo a partir del análisis de las firmas espectrales del suelo utilizando la dimensión fractal (D). La estructura de las costras salinas fue caracterizada a partir del análisis de las firmas fractales (FER) de los espectros de reflectancia, usando las técnicas de rango de reescalado ($D_{R/S}$) y de ondoletas (D_w). Para el análisis estadístico de las FER se aplicó el análisis multivariado y se identificaron las relaciones más significativas entre las FER y las propiedades físicas y químicas del suelo. Se obtuvieron cinco grupos jerárquicos que tuvieron el siguiente orden $g1 < g2 < g3 < g4 < g5$, con base en sus respuestas espectrales evaluadas en la longitud de onda de luz visible (VIS) e infrarrojo (IR) cercano del espectro electromagnético (EM). Se efectuó una prueba comparativa considerando las dimensiones $D_{R/S}$ y D_w . Los resultados muestran que la dimensión $D_{R/S}$ para las FER es un mejor indicador de la estructura de las costras salinas en comparación con la dimensión D_w . Los valores de la dimensión $D_{R/S}$ para cada grupo presentan un orden $1.73 > 1.70 > 1.67 > 1.66$ para los grupos $g1$, $g2$, $g3$ $g4$; y 1.67 para $g5$. Se encontró una alta relación significativa entre las dimensiones $D_{R/S}$ al comparar los cinco grupos. La dimensión D_w no presentó relación significativa con la morfología de las costras. Por tanto, la D es útil para clasificar la estructura de las costras salinas a partir de las firmas fractales (FER) del suelo extraídas de los espectros de reflectancia.

Palabras clave: Dimensión fractal, invariancia al escalado, reflectancia, salinidad.

ABSTRACT

Variability in the soil salinity space has been documented in various studies. Reflectance is an essential variable addressed in them. In this study an alternative method is proposed for the analysis of salinity through the multiscalar data of reflectance. The suggested method extracts information to describe the soil structure as of the analysis of the soil spectral signatures using the fractal dimension (D). The structure of salt crusts was characterized as of the analysis of fractal signatures (FER) of reflectance spectra by using the techniques of rescaling ($D_{R/S}$) and wavelets (D_w) ranges. For the statistical analysis of FER the multivariate analysis was applied and the most significant relationships were identified between FER and the soil physical and chemical properties. Five hierarchical groups were obtained with the following order: $g1 < g2 < g3 < g4 < g5$, on the basis of their spectral responses evaluated on the wavelength of visible light (VIS) and near infrared (NIR) of the electromagnetic spectrum (EM). A comparative test was conducted taking into account the dimensions $D_{R/S}$ and D_w , which showed that the $D_{R/S}$ dimension for FER is a better indicator of the salt crust structure than D_w . The values of the $D_{R/S}$ dimension for each group exhibit the order $1.73 > 1.70 > 1.67 > 1.66$ for the groups $g1$, $g2$, $g3$, $g4$; and 1.67 for $g5$. A significantly high relationship was detected among the $D_{R/S}$ dimensions when comparing the five groups. The D_w dimension showed no significant relationship with the morphology of crusts. Therefore, D is useful to classify the structure of salt crusts as of the soil fractal signatures (FER) extracted from the reflectance spectra.

Key words: Fractal dimension, invariance to scaling, reflectance, salinity.

INTRODUCTION

Salinity is an example of the soil chemical degradation and undergoes significant changes in its physical behaviour. The distribution of salts on the soil is heterogeneous as it is a complex and

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Febrero, 2008. Aprobado: Febrero, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 403-416. 2009.

INTRODUCCIÓN

La salinidad es un ejemplo de degradación química del suelo que presenta cambios significativos en su comportamiento físico. La distribución de sales en el suelo es heterogénea porque éste es un sistema complejo y variable en el espacio y tiempo a diferentes escalas. El patrón de la variabilidad del contenido de sales cambia en función de la estación del año, aumentando su concentración en la temporada de estiaje lo cual afecta el estado físico de la superficie del suelo (Szabolcs, 1979; Sumner y Naidu, 1998) disminuyendo drásticamente su infiltrabilidad. En estas circunstancias resulta difícil monitorear la composición química del suelo con la precisión aceptable, así como recopilar la información a diferentes escalas espaciales. Un estudio multitemporal de la salinidad requiere abordar un gran lapso de tiempo para ser representativo de las tendencias y magnitud de los procesos de degradación, así como para definir los rasgos básicos de la dinámica, extensión y grado de salinización de los suelos (Schmid *et al.*, 2005).

Se han desarrollado nuevas técnicas de monitoreo no destructivo de la salinidad basadas en la medición de reflectancia de la superficie terrestre mediante los sensores remotos (Taylor *et al.*, 1996; Dehaan y Taylor, 2002). Estos sensores miden los distintos rasgos de absorbancia y reflectancia del suelo que corresponden a los rangos del espectro electromagnético (EM), dependiendo todos estos parámetros de las propiedades del suelo, vegetación y superficies acuosas (Viscarra *et al.*, 2006). En ese sentido, cada porción del espectro EM proporciona información específica acerca de algunos atributos de la superficie terrestre que es útil para detectar las oscilaciones de la salinización en el tiempo y espacio.

Los sensores remotos son indispensables para diversos fines, desde la recolección de información multiescalar espacial y temporal sobre los cambios del uso de suelo, hasta el mapeo de los procesos de degradación y propiedades correspondientes (Dwivedi, 2001; Dehaan y Taylor, 2002; Hubbard *et al.*, 2003). El análisis de las firmas espectrales se usa para localizar áreas de concentración de sales y detectar los cambios que ocurren en éste en el tiempo y espacio (Metternicht y Zinck, 2003). La combinación de los datos de reflectancia provenientes de sensores de laboratorio y del campo es una atractiva alternativa para el monitoreo multiescalar de los cambios espaciales y temporales de las costras superficiales del suelo, así como para evaluar las condiciones físicas de las áreas afectadas por salinidad (Howari *et al.*, 2002). Durante el monitoreo de la salinidad es importante correlacionar las firmas espectrales de los patrones espaciales y temporales de las costras superficiales con las propiedades físicas y químicas de los suelos (Metternicht y Zinck, 2003).

variable system in space and time at different scales. The pattern of variability of the salt content changes according to the season of the year; salt concentration increases during the dry season and affects the physical state of the soil surface (Szabolcs, 1979; Sumner and Naidu, 1998), substantially reducing its infiltrability. Under these circumstances, it is difficult to monitor the soil chemical composition with acceptable accuracy, as well as collect information at different spatial scales. A multitemporal study of salinity requires to cover a long period of time for it to be truly representative of the trends and magnitude of the degradation processes, and to define the basic features of the soil dynamics, extension and degree of salinization (Schmidt *et al.*, 2005).

New techniques of non destructive monitoring of salinity have been developed, on the basis of the reflectance measurement of the land surface through remote sensors (Taylor *et al.*, 1996; Dehaan and Taylor, 2002). These sensors measure the different features of the soil absorbance and reflectance corresponding to the ranges of the electromagnetic spectrum (EM), depending all these parameters on the soil properties, vegetation and watery surfaces (Viscarra *et al.*, 2006). In this sense, each portion of the EM spectrum provides specific information on certain attributes of the land surface that is useful to detect the oscillations of salinity in time and space.

Remote sensors are indispensable for various purposes, from the collection of spatial and temporal multiscaling information on the changes of the land use up to the mapping of the degradation processes and corresponding properties (Dwivedi, 2001; Dehaan and Taylor, 2002; Hubbard *et al.*, 2003). The analysis of spectral signatures is used to locate areas of salt concentration and detect the changes registered in this process in time and space (Metternicht and Zinck, 2003). The combination of laboratory reflectance data and field sensors is an attractive alternative for the multiscaling monitoring of spatial and temporal changes of the soil surface crusts, as well as to evaluate the physical conditions of the areas affected by salinity (Howari *et al.*, 2002). During the monitoring of salinity it is important to correlate the spectral signatures of spatial and temporal patterns of the surface crusts with the physical and chemical properties of soils (Metternicht and Zinck, 2003).

With the use of remote sensors and the advantages of statistical techniques, as well as the implementation of mathematical models developed for the analysis of complex systems in the related areas of knowledge (Mandelbrot, 2002), changeable alternatives emerge for the study of soil salinity at different scales. Fractal geometry seems to be especially useful for this end.

Con el uso de los sensores remotos y las ventajas de las técnicas estadísticas así como la aplicación de los modelos matemáticos desarrollados para el análisis de los sistemas complejos en las áreas del conocimiento afines (Mandelbrot, 2002), surgen alternativas variables para estudiar la salinidad de los suelos a diferentes escalas. La geometría fractal parece ser especialmente útil para este fin. Las imágenes adquiridas con sensores del satélite (Dwivedi, 2001; Metternicht y Zink, 2003) así como las fotografías digitales tomadas *in situ* (Oleschko *et al.*, 2004) y registros de datos usando diversas medidas de naturaleza física o química han confirmado su invariancia al escalado (Pachepsky *et al.*, 2003; Panahi y Cheng, 2004; Bryksina y Last, 2005). Por tanto la invariancia al escalado se visualiza como una nueva técnica útil para describir la variabilidad espacial de las propiedades tan complejas y dinámicas como la reflectancia.

La invariancia al escalado es el rasgo principal de un conjunto fractal también conocido como autosimilitud. Un conjunto autosimilar está constituido por partes cuya forma es geoméricamente similar al todo (autosimilitud física), o cuyos momentos estadísticos son independientes de escala (autosimilitud estadística) (Mandelbrot, 2002). Un conjunto autosimilar presenta un escalamiento isotrópico o uniforme en todas las direcciones geométricas mientras que un conjunto autoafín, donde el escalamiento es isotrópico, es decir, el escalamiento se realiza con diferentes magnitudes en dos direcciones perpendiculares (Bryksina y Last, 2005). Las técnicas auto-afines son de importancia primordial para este trabajo.

La dimensión fractal (D), en sus diversas versiones es una medida importante (clasificador o descriptor) del grado de ocupación del espacio Euclidiano común por los objetos fragmentados e irregulares (Mandelbrot, 2002). Las dimensiones fractales del rango de reescalado ($D_{R/S}$) y de ondoletas (D_w) son usadas en este estudio como descriptores de la salinidad de los suelos.

Los objetivos de esta investigación fueron: 1) Determinar los rasgos espectrales de las costras salinas obtenidas de las muestras inalteradas de la superficie del suelo a escala micro (cm^2) usando espectroscopia de laboratorio en el rango 450-968 nm, y establecer la correlación entre las firmas espectrales y los parámetros fractales analizados; 2) relacionar las propiedades fisicoquímicas de los suelos salinos con las dimensiones fractales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio del estudio

El área de estudio se localiza en Montecillo, Estado de México, en la zona noroeste del ex Lago de Texcoco. Los suelos se caracterizan

The images acquired with satellite sensors (Dwivedi, 2001; Metternicht and Zink, 2003), as well as the digital pictures taken *in situ* (Oleschko *et al.*, 2004) and data records by using various measures of physical or chemical nature have confirmed their invariance to scaling (Pachepsky *et al.*, 2003; Panahi and Cheng, 2004; Bryksina and Last, 2005). Therefore, invariance to scaling is viewed as a new useful technique to describe the spatial variability of the highly complex and dynamic properties of reflectance.

Invariance to scaling is the major feature of a fractal set also known as self-similarity. A self similar set is made up of parts whose shape is geometrically similar to the whole (physical self-similarity), or whose statistical moments are scale-independent (statistical self-similarity) (Mandelbrot, 2002). A self similar set displays an isotropic or uniform scaling in all the geometrical directions, whereas a self affine set where scaling is isotropic, the latter is developed with different magnitudes and two perpendicular directions (Bryksina and Last, 2005). The self affine techniques are of the utmost importance for this study.

The fractal dimension (D) in its different versions is an important measure (classifier or descriptor) of the degree of occupation of the common Euclidian space by fragmented and irregular objects (Mandelbrot, 2002). The fractal dimensions of the rescaling ($D_{R/S}$) and wavelets (D_w) ranges are used in this study as descriptors of soil salinity.

The objectives of this study were: 1) To determine the spectral features of the salt crusts obtained from the unaltered samples of the soil surface at micro scale (cm^2) using laboratory spectroscopy at the range of 450-968 nm, and establish the correlation between the spectral signatures and the fractal parameters analyzed; 2) to associate the physicochemical properties of saline soils with the fractal dimensions.

MATERIALS AND METHODS

Study site

The study area is located in Montecillo, State of Mexico, in the northeast of the ex-Lago de Texcoco. Soils are characterized for the formation of salt crusts on the surface, resulting in a typical pattern of large spots of scarce vegetation. These soils are classified as Gleyic Solonchak and calcic Gleysol and are subject to sodium stages (SRH, 1971).

Field sampling

Starting from the radar image of synthetic aperture radar (SAR), ERS-2 of the C band, acquired in 1997, a representative zone affected by salts within the study area was selected. The SAR image is

por formar costras salinas en la superficie, lo cual resulta en un típico patrón del agrupamiento de una escasa cobertura de vegetación en manchones. Estos suelos se clasifican como Solonchak Gléyico y Gleysol cálcico con presencia de fases sódicas (SRH, 1971).

Muestreo del campo

A partir de una imagen de radar de apertura sintética (SAR), ERS-2 de la banda C, adquirida en 1997 se seleccionó una zona representativa afectada por sales dentro del área de estudio. La imagen SAR está representada por tonos de gris (TDG) cuyos valores variaron de cero (negro) a 255 (blanco). Las observaciones de campo y la inspección completa de la imagen SAR constataron que los TDG cercanos a cero se correlaciona con los cuerpos de agua, canales y zonas del cultivo, a diferencia de aquellos grises que tienden a 255 y representan las zonas con suelos afectados por sales y zonas urbanas. Para el muestreo de campo se seleccionó un transecto de 500 m sobre el cual se georeferenciaron 30 superficies de 1 m² con costras salinas utilizando un Sistema de Posicionamiento Global (Garmin'eTrex Vista, USA). Las costras salinas se separaron del suelo tomándolas con una espátula de acero de 12 cm² desde la superficie hasta 5 cm de profundidad, para su caracterización química en el laboratorio.

Para el análisis espectral (cm²) se tomó una muestra inalterada de cada costra salina con un aparato para tomar muestras cilíndrico con forma de anillo (0.033 m diámetro y 0.01 m altura). El muestreo se realizó en junio de 2005, antes de la temporada de lluvias, cuando las condiciones de concentración y distribución espacial de sales sobre la superficie son máximas y representativas para la zona de estudio (Metternicht y Zinck, 2003).

En cada punto de referencia seleccionado en el campo se realizó una lectura del color del suelo con un cromametro CR-310, y un procesador de datos DP-301 Minolta (Japón). En este estudio se compararon dos sistemas de color. El primero es el índice Munsell usado comúnmente en los estudios de suelos, formado por tres atributos conceptuales: matiz, valor y saturación. El segundo es del sistema CIELAB desarrollado por CIE 1976, que utiliza tres principales componentes: la luminosidad L* (similar al valor en el índice Munsell) con valor de 0 a 100, así como dos componentes cromáticos a* (equivalente al color, del rojo al verde) y b* (equivalente al color, del azul al amarillo) (Barrett, 2002).

Caracterización química y física de las costras salinas

La caracterización física y química de las muestras se realizó en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, para las siguientes variables: el contenido de la materia orgánica (MO, Walkley y Black, 1934); el pH del suelo (relación 1:2, en el extracto de saturación, medido en un equipo Conductronic); contenido de los aniones solubles; concentración de carbonatos (CO₃²⁻) y bicarbonatos (HCO₃⁻) (por volumetría de neutralización); y el contenido de los cloruros (Cl⁻, por volumetría de precipitación), nitratos (NO₃⁻, por nitratación con ácido salicílico), y sulfatos (SO₄²⁻, por turbidimetría con goma arábica). Además, se determinó la concentración de los cationes

representados por tonos de gris (TDG) cuyos valores variaron de cero (negro) a 255 (blanco). The field observations and full inspection of SAR imaging proved that the TDG near zero are correlated with water bodies, channels and cultivation zones, unlike the grey ones that are closer to 255 and represent the soil areas affected by salts and urban zones. For field sampling a 500 m transect was selected over which 30 surface areas of 1 m² with salt crusts were georeferenced by using a Global Positioning System (Garmin'eTrex Vista, USA). Salt crusts were removed with a steel spatula of 12 cm² from the surface down 5 cm deep for their laboratory chemical analysis.

For the spectral analysis (cm²) an unaltered sample was taken from each salt crust using a ring-shaped cylindrical tool (0.033 m in diameter and 0.01 high). Sampling was carried out in June 2005, prior to the rainy season, when the conditions of salt concentration and spatial distribution on the surface are at their highest level, with a performance characteristic of the study area (Metternicht and Zinck, 2003).

In each point of reference selected in the field a soil color reading was made with a CR-310 chromameter and a DP301 Minolta (Japan) data processor. Two color systems were compared in this study. The first one is the Munsell index commonly used in soil studies, formed by three conceptual attributes: hue, value and chroma. The second one is from the CIELAB system developed by CIE 1976, and uses three main components: the L* luminosity (similar to the Munsell index value) with a value from 0 to 100, as well as two chromatic components a* (equivalent to color, from red to green) and b* (equivalent to color, from blue to yellow) (Barrett, 2002).

Chemical and physical characterization of salt crusts

The physical and chemical characterization of samples was carried out at the Natural Resources Institute Soil Fertility Laboratory of the Colegio de Postgraduados for the following variables: content of organic matter (MO, Walkley and Black, 1934); soil pH (relationship 1:2, in the saturation extract measured with a Conductronic equipment); content of soluble anions; concentration of carbonates (CO₃²⁻) and bicarbonates (HCO₃⁻) (by neutralization volumetry); and the content of chlorides (Cl⁻, by precipitation volumetry), nitrates (NO₃⁻, by nitration with salicylic acid) and sulfates (SO₄²⁻, by turbidimetry with arabic gum). In addition, the concentration of soluble cations was determined, namely sodium (Na⁺) and potassium (K⁺) (by spectrophotometry of atomic emission), calcium (Ca²⁺) and magnesium (Mg²⁺) (by spectrophotometry of atomic absorption). Electric conductivity (CE) was measured in the saturation extract (previously preparing the saturation paste by using a conductivity cell). Also the saturation percentage (PSI) derived from the graphic relationship of Ca²⁺, Mg²⁺ and Na⁺, and the sodium adsorption relationship was determined; $RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{1/2}$. Of the physical properties, the distribution of particles by size was quantified (with the hydrometer method by Bouyoucos, 1936). The chemical and physical methods used for each analysis were collected by Richards (1985) and Etchevers (1992).

solubles: sodio (Na^+) y potasio (K^+) (por espectrofotometría de emisión atómica), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) (por espectrofotometría de absorción atómica). La conductividad eléctrica (CE) se midió en el extracto de saturación (previa preparación de la pasta de saturación, utilizando una celda de conductividad). También se determinó el porcentaje de saturación (PSI) derivado de la relación gráfica de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , y relación de adsorción de sodio; $\text{RAS} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}$. De las propiedades físicas se cuantificó la distribución de partículas por tamaño (por el método del hidrómetro de Bouyoucos, 1936). Los métodos químicos y físicos utilizados para cada análisis fueron recopilados por Richards (1985) y Etchevers (1992).

Reflectancia

Los espectros de reflectancia fueron leídos en un monocromador (77480 MS127iTM) con el detector LineSpec™ CCD (77850), Termo Oriel, Canadá, dentro de la longitud de onda de la luz visible (VIS) e infrarrojo (IR) cercano en el rango de 450 a 968 nm, y con una resolución espectral de 2.93 nm. A fin de calibrar las lecturas espectrales de los suelos salinos se utilizó como referencia estándar un material denominado Espectralon Labsphere que presenta altos valores de reflectancia (80-85 %) sobre un rango espectral de 200 a 2500 nm (Stokman *et al.*, 2000; Jackson *et al.*, 2003).

Análisis fractal

Para el análisis fractal de los espectros de reflectancia se utilizó un paquete comercial de referencia Benoit 1.3 (2006) que contiene cinco técnicas diseñadas para el análisis de los conjuntos auto-similares y cinco para los auto-afines. El análisis fractal de los conjuntos auto-similares se realiza a partir de las imágenes bi-dimensionales obtenidas por los sensores remotos de diferente resolución espacial. La auto-afinidad se analiza a partir de las trazas o series de tiempo. Estas últimas son considerados como un fractal auto-afín. En el presente trabajo se utilizaron dos técnicas auto-afines: el rango de reescalado ($D_{R/S}$) y de ondoletas (D_w).

Firmas fractales (FER) de los espectros de reflectancia

Con el conjunto de datos que forman los espectros de reflectancia de las costras salinas en el rango espectral de 450 a 968 nm (2048 datos), se construyó la firma espectral de reflectancia (FER) la cual es un perfil que en el contexto de este trabajo se consideró análogo a una serie de tiempo y cuya invariancia al escalado constituye un indicador de la naturaleza fractal de los datos. La rugosidad de las firmas fractales se midió con las técnicas diseñadas para los conjuntos fractales auto-afines del paquete Benoit 1.3, a partir de las dimensiones fractales $D_{R/S}$ y D_w .

Análisis multivariante del espectro

Para caracterizar las costras salinas a partir de sus rangos espectrales se utilizó la técnica de agrupamiento. Esta técnica consiste

Reflectance

The reflectance spectra were read in a monochromator (77480 MS127iTM) with the LineSpec™ CCD(77850) detector, Termo Oriel, Canada, within the wavelength of visible light (VIS) and near infrared (NIR) in the range of 450 to 968 nm, and with a spectral resolution of 2.93 nm. In order to calibrate the spectral readings of saline soils a material known as Espectralon Labsphere was used as standard reference. This material shows high values of reflectance (80-85 %) on a spectral range going from 200 to 2500 nm (Stokman *et al.*, 2000; Jackson *et al.*, 2003).

Fractal analysis

For the reflectance spectra fractal analysis a commercial package of reference Benoit 1.3 (2006) was utilized. This package contains five techniques designed for the analysis of self similar sets and five for the self affine. The fractal analysis of self similar sets is developed as of the bidimensional images obtained by remote sensors of different spatial resolution. Self-affinity is analyzed starting from traces or time series. The latter are considered a self affine fractal. In the present study two self-affine techniques were employed: the ranges of rescaling ($D_{R/S}$) and wavelets (D_w).

Fractal signatures (FER) of the reflectance spectra

With the data on the salt crust reflectance spectra at the spectral range from 450 to 968 nm (2048 data), the reflectance spectral signature (FER) was built, which is a profile considered in this study similar to a time series and whose invariance to scaling constitutes an indicator of the fractal nature of the data. The roughness of fractal signatures was measured with the techniques designed for the self-affine fractal sets from the Benoit 1.3 package as of the fractal dimensions $D_{R/S}$ and D_w .

Spectrum multivariant analysis

To describe salt crusts starting from their spectral ranges the grouping technique was used. This technique consists in classifying a set of data based on the distance among them and their similarity, considering that proximity reflects similarity. To determine the similarity distance, the square centroid method was used (Lawson and Denison, 2002). The grouped salt crusts have a reflectance spectra in a range from 450 to 968 nm that was divided into four subregions. The subdivision was made according to the wavelengths corresponding to the bands of the Landsat Thematic Mapper TM4, following the methodology by Post *et al.* (2000), and reaching the blue region (400-520 nm), green (520-600 nm), red (630-690 nm) and near infrared (IR)(760-900 nm). The grouping of the 30 reflectance spectra as from the average value of each set region allowed to identify five groups of crusts (g1, g2, g3, g4 and g5).

Then the data both of the FER and of the physical and chemical properties of the crusts obtained in the laboratory were analyzed by groups. The hierarchical conglomerates and statistical analysis were

en clasificar un conjunto de datos con base a la distancia entre ellos y su similitud, considerando que la proximidad refleja la similitud. Para determinar la distancia de similitud se usó el método del centroide al cuadrado (Lawson y Denison, 2002). Las costras salinas agrupadas tienen los espectros de reflectancia en un rango de 450 a 968 nm que se dividió en cuatro sub-regiones. La subdivisión se hizo de acuerdo a las longitudes de onda correspondientes a las bandas del Mapeador Temático Landsat TM4, según la metodología de Post *et al.* (2000), llegando a la región azul (400-520 nm), verde (520-600 nm), rojo (630-690 nm) e infrarrojo (IR) cercano (760-900 nm). La agrupación de los 30 espectros de reflectancia a partir del valor promedio de cada región señalada permitió identificar cinco grupos de costras (g1, g2, g3, g4 y g5).

Luego, los datos tanto de las FER como de las propiedades físicas y químicas de las costras obtenidas en el laboratorio se analizaron por grupos. Los conglomerados jerárquicos y el análisis estadístico se efectuaron con el Statgraphics Plus versión 5.1 (Statistical Graphics, Rockville, MD), calculando los valores mínimos y máximos, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, además de las medidas de asimetría y curtosis. Para determinar las medias significativamente diferentes con los valores de las dimensiones fractales ($D_{R/S}$ y D_w) se realizó una prueba de comparación múltiple usando el método de Fisher (LSD, Freud, 1992). Por último se realizó un análisis de varianza para conocer la significancia estadística de las diferencias observadas entre las propiedades de las costras representativas de los diferentes grupos (Walpole *et al.*, 2002), y para establecer las correlaciones entre las propiedades físicas y químicas estudiadas con las dimensiones $D_{R/S}$ y D_w .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas espectrales de las costras salinas

La mayoría de las variables estudiadas se ajustaron a la distribución normal, excepto los datos del matiz y D_w del grupo g1; matiz y contenido de arena del grupo g2; la saturación y SO_4^{2-} del grupo g3; matiz y pH del grupo g4 y CO_3^{2-} y MO del grupo g5, cuyos valores de asimetría y curtosis están fuera del rango de ± 2 . De acuerdo con los resultados del análisis químico, las costras salinas estudiadas se caracterizan por valores altos de pH (> 10) de la concentración de sales. Según los valores de CE, PSI y RAS el suelo se clasificó como salino-sódico (Richards, 1985). La concentración de los aniones en las costras decrece en el siguiente orden: $SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-} > NO_3^- > HCO_3^-$. El contenido promedio de MO es 2.8 % clasificándose el suelo como medianamente rico (Vázquez, 1997)¹.

De acuerdo al índice de color Munsell en las curvas espectrales g1, g2 y g4 predomina el matiz Y (amarillo) y YR (rojo amarillo), mientras que los grupos g3

performed with Statgraphics Plus versión 5.1 (Statistical Graphics, Rockville, MD), calculating the minimum and maximum values, the average, standard deviation and variation coefficient, plus the asymmetry and kurtosis measures. To determine mean values which are significantly different with the values of the fractal dimensions ($D_{R/S}$ and D_w) a multiple comparison test was conducted using the Fisher method (LSD, Freud, 1992). Finally, a variance analysis was performed to learn about the statistical significance of the differences observed among the properties of the crusts representative of the different groups (Walpole *et al.*, 2002), and to establish the correlations between the physical and chemical properties studied and the dimensions $D_{R/S}$ and D_w .

RESULTS AND DISCUSSION

Spectral curves of the salt crusts

Most of the variables adjusted to the normal distribution except the hue and D_w data of g1 group; hue and sand content of g2 group; saturation and SO_4^{2-} of group g3; hue and pH of group g4 and CO_3^{2-} and MO of group g5, whose values of asymmetry and kurtosis are out of the ± 2 range. According to the results from the chemical analysis, the salt crusts studied are characterized by high pH (> 10) values from salt concentration. According to the CE, PSI and RAS values, the soil was classified as saline-sodium (Richards, 1985). The concentration of anions in crusts decreases in the following order: $SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-} > NO_3^- > HCO_3^-$. The average content of MO is 2.8 %, classifying the soil as fairly rich (Vázquez, 1997)¹.

According to the Munsell color index, in the spectral curves g1, g2 and g4 the Y hue (yellow) and YR (red yellow) prevail, while groups g3 and g5 only display hue in Y. In the CIELAB color system, the five groups mentioned have a luminosity very similar to the values of L^* that vary between 61.3 and 71.4, indicating that in this color space the crust groups tend to be fair and brighter than the soil surrounding them, whereas the parameters a^* and b^* mark a trend towards the red-yellow color, matching the trends documented with the Munsell index hue dynamics (Figure 1).

In Table 1 are shown the mean values of fractal dimensions ($D_{R/S}$ and D_w) extracted from the spectral curves corresponding to the five groups of crusts studied. Despite the apparent similarity of the values recorded in the $D_{R/S}$ and D_w dimensions of the study groups, they were statistically different ($p \leq 0.05$). Significant differences were registered in the mean values of the $D_{R/S}$ dimension, while for D_w the average value changes were not substantial (Table 1). The

¹ Vázquez A., A. 1997. Guía para interpretar el análisis físico del agua y suelo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo, México, 31 p.

y g5 sólo presentan matiz en Y. En el sistema de color CIELAB, los cinco grupos mencionados tienen una luminosidad muy similar con valores de L^* que varían entre 61.3 a 71.4, lo cual indica que en este espacio de color los grupos de costras tienden a ser claros con una brillantez mayor que del suelo que los rodea, mientras que los parámetros a^* y b^* marcan una tendencia al rojo-amarillo, coincidiendo con las tendencias documentadas con la dinámica del matiz del índice Munsell (Figura 1).

En el Cuadro 1 se presentan los valores medios de las dimensiones fractales ($D_{R/S}$ y D_w) extraídas de las curvas espectrales correspondientes a los cinco grupos de costras estudiados. A pesar de la similitud aparente de los valores de dimensiones $D_{R/S}$ y D_w de los grupos analizados éstos fueron estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Las diferencias significativas se obtuvieron para los valores medios de la dimensión $D_{R/S}$, mientras que para D_w los cambios en el valor promedio no fueron significativos (Cuadro 1). Las máximas dimensiones fractales ($D_{R/S}$ y D_w) correspondieron al grupo g1, que presentó el menor nivel de reflectancia (Figura 1a) y que también se identificó por el valor más bajo del componente saturación (0.6) del índice Munsell. Sobre la reducción de los valores de saturación y su efecto en la reflectancia, Metternicht y Zinck (2003) documentaron que con un decremento de al menos dos unidades cromáticas en el índice Munsell, la reflectancia disminuía de 6/5 a 6/3. Los valores mínimos de dimensión fractal extraídos con el método $D_{R/S}$ se encontraron para los grupos g4 y g5, siendo la dimensión fractal de ondoletas significativamente mayor (Cuadro 1). Cabe señalar que estos dos grupos de costras salinas presentaron las curvas de reflectancia más altas (Figuras 1a y 1b), cuyo comportamiento coincidió con los valores altos de valor del índice Munsell (6.4 y 6.7) y con los valores intermedios de la luminosidad (L^*) del sistema color CIELAB (65.6 y 68.5), lo cual origina la mayor luminosidad y por tanto un mayor nivel de reflectancia del suelo.

Las magnitudes intermedias de las dimensiones fractales ($D_{R/S}$ y D_w) se encontraron para los grupos g2 y g3 (Cuadro 1), lo cual coincidió con su respuesta espectral intermedia. Cada uno de los grupos de costras mencionados está definido por su color, principalmente en el índice Munsell con el valor de saturación de 0.9 para el grupo g2 y 1.0 para g3. La diferencia de 0.1 unidades cromáticas corresponde a un aumento en la respuesta espectral del grupo g3. Se encontró una diferencia significativa ($p \leq 0.05$) con R^2 de 0.76 cuando se compararon los cinco grupos de costras salinas de acuerdo a sus respuestas espectrales y el valor promedio de la dimensión $D_{R/S}$. En cambio, las relaciones entre la dimensión de ondoletas (D_w) y la reflectancia

maximum fractal dimensions ($D_{R/S}$ and D_w) corresponded to group g1, showing the lowest level of reflectance (Figure 1a) and was also identified for the lowest value of the Munsell index chroma component (0.6). About the reduction of saturation values and their effect on reflectance, Metternicht and Zinck (2003) found out that a decrease of at least two chromatic units in the Munsell index led to a reduction of reflectance from 6/5 to 6/3. By using the $D_{R/S}$ method, the minimum values of the fractal dimension were registered in g4 and g5 groups, while the wavelet fractal dimension was significantly higher (Table 1). It is worth mentioning that these two groups of salt crusts exhibited the highest reflectance curves (Figures 1a and 1b), whose performance matched the high values of the

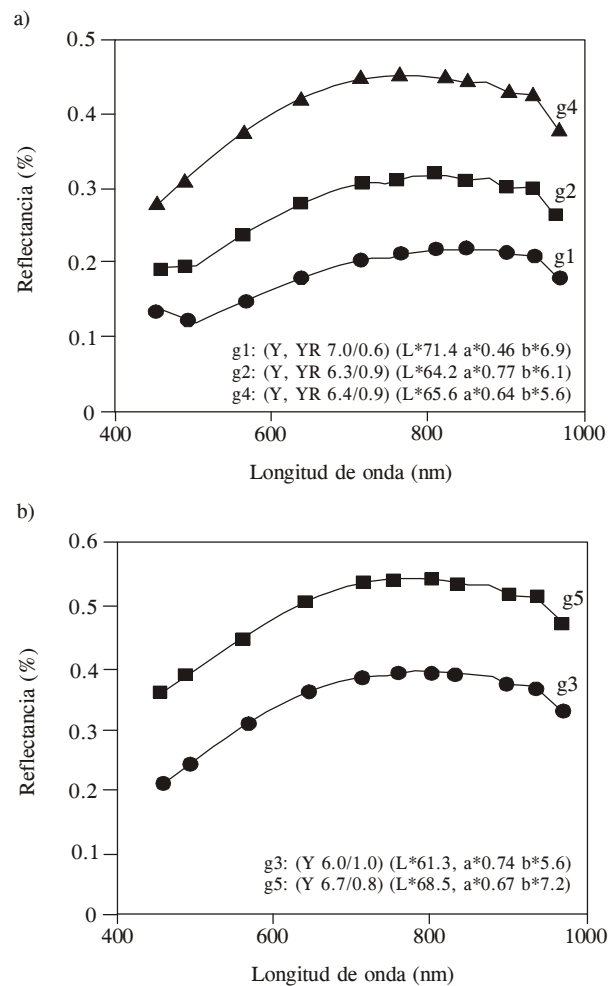


Figura 1. Espectros de reflectancia que representan los grupos formados. Se muestran los valores promedios del color evaluados en los dos sistemas de color Munsell y CIELAB.

Figure 1. Reflectance spectra representing the formed groups; color average values evaluated in the two systems of Munsell color and CIELAB are presented.

Cuadro 1. Comparación de medias de las dimensiones fractales obtenidas a partir de las firmas de los espectros de reflectancia (FER).**Table 1. Comparison of fractal dimension mean values obtained from the signatures of reflectance spectra (FER).**

Dimensión fractal	Grupos				
	g1	g2	g3	g4	g5
D_w	1.80ab	1.86ab	1.77a	1.89b	1.89ab
$D_{R/S}$	1.73a	1.70b	1.67c	1.66c	1.67c

Medias con diferente letra en una columna son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$; LSD) ♦ Mean values in a column with a different letter are significantly different ($p \leq 0.05$; LSD).

de los grupos salinos no fueron significativas ($R^2=0.36$) ($p > 0.05$).

Relación entre las firmas de los espectros de reflectancia (FER) y rangos espectrales, color, textura y propiedades químicas de las costras

La asociación entre los grupos de costras salinas y las firmas fractales (FER) de las porciones del espectro VIS y IR cercano, así como las propiedades químicas se presentan en los Cuadros 2 y 3. Todas las correlaciones encontradas son lineales. En los Cuadros se muestra sólo las variables con $R^2 > 0.33$. Para el grupo g1 se encontró una diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre la dimensión fractal $D_{R/S}$ y el rango azul del espectro visible, siendo ésta no significativa con los rangos verde, rojo e IR cercano ($p > 0.05$). El alto valor de R^2 documentado entre la dimensión fractal del rango reescalado y el rango azul del espectro visible sugiere un mejor ajuste lineal en comparación con los otros rangos del espectro de la región estudiada (Cuadro 2). Además, el R^2 de la asociación entre de $D_{R/S}$ y los parámetros de color calculados en ambos sistemas fue menor a 0.33, mejorando para la textura (Cuadro 2). A excepción de la CE y MO, las variables químicas fueron significativamente diferentes entre las costras con distinta dimensión $D_{R/S}$, presentando la concentración del ión Cl^- , PSI y RAS, altos valores de R^2 (Cuadro 3). El efecto de la materia orgánica y el contenido de arcilla sobre la respuesta espectral ha sido discutido por Ben-Dor *et al.* (1999) y Hummel *et al.* (2001), quienes concluyeron que el aumento en valores de estas variables ocasiona un decremento en la respuesta espectral de los suelos, refiriéndose principalmente a la región visible del espectro.

La misma tendencia se ha observado para las costras salinas formadas por el cloruro de sodio (Clark, 1999; Howari *et al.*, 2002), cuyo comportamiento es similar al grupo g1 de la presente investigación donde los valores promedio de Cl^- (447.8 meq L^{-1}), CE (33 dS

Munsell index value(6.4 and 6.7) and the intermediate values of luminosity (L^*) of the CIELAB color system (65.6 and 68.5). This leads to greater luminosity and thus a higher level of soil reflectance.

Intermediate magnitudes of fractal dimensions ($D_{R/S}$ and D_w) were recorded by groups g2 and g3 (Table 1), which coincided with their intermediate spectral response. Each one of the crust groups mentioned is defined by its color, mainly in the Munsell index, with the chroma value of 0.9 for the g2 group and 1.0 for g3. The difference of 0.1 chromatic units corresponds to an increase in the spectral response of group g3. A significant difference ($p \leq 0.05$) was found with R2, of 0.76 when the five saline crust groups were compared in relation to their spectral responses and the average value of the $D_{R/S}$ dimension. By contrast, the relationships between the wavelets (D_w) and reflectance dimensions of saline groups were not significant ($R^2=0.36$; $p > 0.05$).

Relationship between the signatures of reflectance spectra (FER) and spectral ranges, color, texture and chemical properties of crusts.

The association between salt crust groups and fractal signatures (FER) of the VIS and near IR spectrum portions, as well as their chemical properties are presented on Tables 2 and 3. All the correlations found are linear. Only the variables with the coefficient $R^2 > 0.33$ are shown in the Tables. In group g1 a significant difference ($p \leq 0.05$) was registered between the fractal dimension $D_{R/S}$ and the blue range of the visible spectrum; in the green, red and near infrared ranges this difference was not significant ($p > 0.05$). The high value of R^2 registered between the rescaling range fractal dimension and the blue range of the visible spectrum suggests a better linear adjustment compared to the rest of the spectrum ranges of the study region (Table 2). In addition, the R^2 from the association between $D_{R/S}$ and the color parameters calculated in both systems was less than 0.33, with a higher value for texture (Table 2). With the exception of CE and MO, the chemical variables were significantly different among the crusts with different $D_{R/S}$ dimension, showing the concentration of ion Cl^- , PSI and RAS high values of R^2 (Table 3). The effect of organic matter and clay content on the spectral response has been analyzed by Ben-Dor *et al.* (1999) and Hummel *et al.* (2001), who concluded that the value rise of these variables leads to a decrease in the spectral response of soils, mostly referring to the visible region of the spectrum.

The same trend has been observed in salt crusts formed by sodium chloride (Clark, 1999; Howari *et al.*, 2002), whose performance is similar to group g1

Cuadro 2. Análisis estadístico de la asociación entre las firmas fractales (FER) y las longitudes de onda del visible (VIS) e infrarrojo (IR) cercano, el color y la textura de las costras salinas.**Table 2. Statistical analysis of the association between fractal signatures (FER) and wavelengths of the visible (VIS) and near infrared (NIR), color and texture of salt crusts.**

Variables	FER por $D_{(R/S)}$					FER por $D_{(w)}$				
	g1	g2	g3	g4	g5	g1	g2	g3	g4	g5
azul	0.96 [†]	(-)	(-)	0.33	0.34	(-)	(-)	(-)	(-)	0.35
verde	0.39	0.80 [†]	(-)	(-)	0.94 [†]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
rojo	0.34	0.89 [†]	0.59 [†]	(-)	(-)	0.33	(-)	(-)	0.44	(-)
IR cercano	0.49	0.38	0.75 [†]	(-)	(-)	(-)	0.39	(-)	0.40	0.86
Munsell										
matiz	(-)	0.34	0.65 [†]	(-)	0.77	0.97 [†]	(-)	(-)	(-)	(-)
valor	(-)	(-)	0.45	0.62 [†]	0.42	0.88	(-)	(-)	(-)	(-)
saturación	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.57	(-)	(-)	(-)	0.34
CIELAB										
L*	(-)	(-)	0.46	0.59 [†]	0.40	0.85	(-)	(-)	(-)	(-)
a*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
b*	(-)	(-)	0.49 [†]	(-)	(-)	0.33	0.37	(-)	0.56 [†]	(-)
Textura										
arena	0.43	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.63	0.47	0.74 [†]	(-)
limo	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.62	(-)	0.68 [†]	(-)
arcilla	0.65	(-)	(-)	(-)	0.59	(-)	(-)	0.54 [†]	0.38	(-)

g: número de grupo ♦ g: group number.

(-): $R^2 < 0.33$.†: significativo ($p \leq 0.05$) ♦ significant ($p \leq 0.05$).†: significativo ($p \leq 0.01$) (LSD) ♦ significant ($p \leq 0.01$) (LSD).**Cuadro 3. Análisis estadístico de la asociación entre las firmas fractales (FER) y las propiedades químicas de las costras salinas.****Table 3. Statistical analysis of the association between fractal signatures (FER) and the chemical properties of salt crusts.**

Variables	FER por $D_{(R/S)}$					FER por $D_{(w)}$				
	g1	g2	g3	g4	g5	g1	g2	g3	g4	g5
CO ₃ ²⁻	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
HCO ₃ ⁻	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.60	(-)	(-)	0.37	0.35
Cl ⁻	0.91 [†]	(-)	(-)	0.41	0.70	(-)	(-)	0.69	(-)	(-)
NO ₃ ⁻	(-)	0.95 [†]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.87 [†]	(-)	(-)
SO ₄ ²⁻	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.84 [†]	(-)	(-)	0.51
pH	(-)	(-)	(-)	(-)	0.49	(-)	0.40	(-)	(-)	(-)
CE	0.71	0.49	(-)	(-)	(-)	(-)	0.36	(-)	(-)	(-)
PSI	0.96 [†]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.68
RAS	0.91 [†]	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0.72
MO	0.47	0.55	(-)	(-)	(-)	0.41	(-)	0.54 [†]	(-)	0.81

g: número de grupo ♦ g: group number.

(-): $R^2 < 0.33$.†: significativo ($p \leq 0.05$) ♦ significant ($p \leq 0.05$).†: significativo ($p \leq 0.01$) (LSD) ♦ significant ($p \leq 0.01$) (LSD).

m⁻¹) y arcilla (47.18 %), son altos. Es factible concluir que el grupo de costras g1 se caracteriza por una menor reflectancia en comparación con los otros grupos analizados (Figura 1). La estrecha asociación entre la dimensión fractal ($D_{R/S}$) y el contenido de arcilla sugiere que las máximas dimensiones fractales en este grupo se deben al dominio de las partículas de arcilla del suelo, sobre otros elementos texturales. El efecto documentado de la arcilla sobre la dimensión fractal

where the average values of Cl⁻ (447.8 meq L⁻¹), CE (33 dS m⁻¹) and clay (47.18 %) are high. We may conclude that the g1 group of crusts is characterized by a lower reflectance compared to the other groups (Figure 1). The close association between the fractal dimension ($D_{R/S}$) and clay content may suggest that the maximum fractal dimensions in this group result from the prevalence of soil clay particles over other textural elements. In the present study, the effect of clay on the

en el presente estudio, es similar al encontrado por Oleschko *et al.* (2000). Cabe mencionar que el valor promedio de la dimensión fractal $D_{R/S}$ del grupo de costras salinas g1 es significativamente diferente a los otros grupos (Cuadro 1).

El grupo g2 presentó diferencias estadísticamente significativas entre $D_{R/S}$ y la región verde y altamente significativas ($p \leq 0.01$) en la región rojo del espectro EM. La magnitud de R^2 para los rangos del espectro mencionado fue alta (Cuadro 2). Esta diferencia se asoció al incremento en la respuesta espectral del grupo g2 (Figura 1a).

La asociación entre $D_{R/S}$ y NO_3^- , también es altamente significativa aunque entre $D_{R/S}$ y MO no lo es (Cuadro 3), a pesar de que el valor promedio de concentración de NO_3^- en las costras estudiadas es alto (144.7 meq L^{-1}) y coincide con un valor alto de MO (3.0 %). En cambio la relación entre MO y NO_3^- es negativa y significativa estadísticamente ($R^2 = 0.74$). La ecuación del modelo ajustado que describe esta última correlación es: $\text{NO}_3^- = -36.15(\text{MO}) + 252.10$, indicando que a mayor contenido de MO corresponde una menor concentración de NO_3^- . Esta misma tendencia fue observada para la función derivada de la relación entre $D_{R/S}$ y NO_3^- ($\text{NO}_3^- = -2073(D_{R/S}) + 3659$), lo cual indica un incremento de $D_{R/S}$ (mayor rugosidad de la superficie) con la disminución de la concentración de NO_3^- en la costra salina.

Los datos de la dimensión fractal de ondoletas (D_w) para el mismo grupo g2 se asociaron significativamente con el contenido de SO_4^{2-} (Cuadro 3). Crowley (1993) y Howari *et al.* (2002) reportan que las costras más desarrolladas morfológicamente y por ende más fácilmente identificadas a nivel visualmente son aquellas constituidas por sales que contienen SO_4^{2-} , cuya presencia aumenta la reflectancia de los suelos desde 500 nm de longitud de onda. Las costras con alto contenido de SO_4^{2-} además forman las superficies con apariencia más abultada, hecho que también coincide con el aumento de su reflectancia en la región VIS (Szalboics, 1979; Metternicht y Zinck, 2003). La estructura y el grado del desarrollo de las costras cambian con el contenido y presencia de las sales originando una redistribución de las partículas por el tamaño y por tanto de la textura en general (Howari *et al.*, 2002; Ben-Dor *et al.*, 2003). El grupo de costras g2 presenta promedios altos de SO_4^{2-} ($1441.5 \text{ meq L}^{-1}$) asociados al mayor contenido de arena (28.17 %), ambas variables superiores a las encontradas en el grupo g1 que, al contrario, se caracterizó por tener el más alto contenido de arcilla (47.18 %). El valor medio de la dimensión $D_{R/S}$ establecido para este grupo mostró una diferencia estadísticamente significativa con los valores medios de la misma variable de las costras de los grupos g1 y g3 (Cuadro 1).

fractal dimension is similar to that found by Oleschko *et al.* (2000). The average value of the $D_{R/S}$ fractal dimension of the saline crust group g1 is statistically different to the rest of the groups (Table 1).

Group g2 presented statistically significant differences between $D_{R/S}$ and the green region and highly significant ($p \leq 0.01$) differences in the red region of the EM spectrum. The R^2 magnitude for the ranges of the spectrum mentioned was high (Table 2). This difference was associated with an increase of the spectral response by group g2 (Figure 1a).

The association between $D_{R/S}$ and NO_3^- is also highly significant, though between $D_{R/S}$ and MO it is not (Table 3), despite the fact that the average value of NO_3^- concentration in the crusts studied is high (144.7 meq L^{-1}) and matches with a high value of MO (3.0 %). By contrast, the relationship between MO and NO_3^- is negative and statistically significant ($R^2 = 0.74$). The equation of the adjusted model describing this last correlation is: $\text{NO}_3^- = -36.15(\text{MO}) + 252.10$, indicating that a higher MO content brings about a lower concentration of NO_3^- . This same trend was observed in the function derived from the relationship between $D_{R/S}$ and NO_3^- ($\text{NO}_3^- = -2073(D_{R/S}) + 3659$), pointing at an increase of $D_{R/S}$ (greater roughness of the surface) with a lower concentration of NO_3^- in the salt crust.

The data of the wavelets fractal dimension (D_w) for the same g2 group were significantly associated fashion with the content of SO_4^{2-} (Table 3). Crowley (1993) and Howari *et al.* (2002) report that the crusts more morphologically developed and therefore more easily identifiable visually are those made up of salts containing SO_4^{2-} , whose presence enhances soil reflectance as of 500 nm wavelength. Crusts with a high content of SO_4^{2-} also form surfaces with a more voluminous appearance, matching with their greater reflectance in the VIS region (Szalboics, 1979; Metternicht and Zinck, 2003). Crust structure and degree of development change with the content and presence of salts, leading to a redistribution of particles according to their size and therefore, of general texture (Howari *et al.*, 2002; Ben-Dor *et al.*, 2003). The g2 group of crusts registers high averages of SO_4^{2-} ($1441.5 \text{ meq L}^{-1}$) associated with the higher content of sand (28.17 %), being both variables above those found in group g1. This one, on the contrary, showed the highest content of clay (47.18 %). The dimension $D_{R/S}$ mean value set for this group exhibited a statistically significant difference with the mean values of the same variable of the crusts corresponding to groups g1 and g3 (Table 1).

In g4 group, the association between the $D_{R/S}$ fractal dimension and the value parameters of the Munsell index and L^* of the CIELAB system were statistically significant and showed high values of R^2 (Table 2).

En el grupo g4, la asociación entre la dimensión fractal $D_{R/S}$ y los parámetros valor del índice Munsell y L^* del sistema CIELAB fueron significativas estadísticamente y con altos valores de R^2 (Cuadro 2). Estas tendencias concuerdan con las relaciones genéricas establecidas entre el tamaño de la partícula y el color de las costras salinas, donde el limo (33.06 %) es el principal responsable del aumento de la luminosidad de la superficie expresado en las figuras del valor del color y L^* de ambos sistemas de color estudiados, a cuyo cambio se asoció el aumento en la reflectancia total del suelo (Viscarra *et al.*, 2006). Las texturas dominadas por el limo han movido la respuesta espectral de las costras hacia las regiones verde y rojo del espectro EM, como fue reportado por Hummel *et al.* (2001) y Sánchez-Marañón *et al.* (2004). Lo discutido es consistente con la respuesta espectral del grupo g4 como se observa en el comportamiento de la pendiente de la curva del espectro de reflectancia (Figura 1a).

En el análisis de ondoletas, para este mismo grupo de costras (g4) se han establecido las siguientes dos relaciones significativas estadísticamente; entre la dimensión fractal D_w y el contenido de arena y limo; entre la dimensión fractal y el valor del componente b^* del color CIELAB (Cuadro 2). El efecto de la textura y brillantez sobre la energía reflejada ha sido estudiado en el laboratorio por Ben-Dor *et al.* (1999). Conforme la costra evoluciona las partículas del suelo se dispersan y se redistribuyen sobre la superficie (Ben-Dor *et al.*, 2003). Este fenómeno se ha relacionado más con el contenido del limo que de la arena, así como con los efectos ocasionados por la presencia de SO_4^{2-} ($1421.3 \text{ meq L}^{-1}$) en el suelo. El valor medio de la dimensión $D_{R/S}$ de las costras g4 es estadísticamente diferente a los grupos g1 y g2 (Cuadro 1) justificando en parte su posición en la respuesta espectral de los suelos analizados (Figura 1a).

En el grupo g3 las relaciones establecidas entre la dimensión $D_{R/S}$ y las regiones rojo e IR cercano del espectro EM, también fueron significativas; así como entre la dimensión $D_{R/S}$ y los parámetros matiz del índice Munsell y b^* del sistema CIELAB, aunque en éste último caso el valor de R^2 fue uno de los más bajos. De acuerdo con lo anterior se infiere que la respuesta espectral del grupo de costras g3 está definida mayormente por la cantidad de luz reflejada en los rangos espectrales de la región rojo e IR cercano, asociado a su vez a la estructura homogénea de la costra, de la cual se derivan los parámetros de color en ambos sistemas (Munsell y CIELAB) comparados (Figura 1b). El grupo g3 tiene un promedio alto contenido de arena entre los elementos texturales, en comparación con los otros grupos (31.11 %) lo cual permite suponer que de esta diferencia se derivó el incremento en la respuesta

These trends concur with the generic relationships established between the particle size and the color of salt crusts, where silt (33.06 %) is largely responsible for the surface increased luminosity expressed in the figures of the color value and L^* of both color systems. The change of the latter was associated with the higher total reflectance of the soil (Viscarra *et al.*, 2006). Textures where silt prevails have transferred the spectral response from the crusts to the green and red regions of the EM spectrum, as reported by Hummel *et al.* (2001); and Sánchez-Marañón *et al.* (2004). This is consistent with the spectral response of group g4, as observed in the slope of the curve of the reflectance spectrum (Figure 1a).

In the analysis of wavelets in the g4 group of crusts the following two statistically significant relationships have been established: one between the D_w fractal dimension and the sand and silt content; and another one between the fractal dimension and the value of the b^* component of the CIELAB color (Table 2). The effect of texture and brightness on the reflected energy has been examined at the laboratory by Ben-Dor *et al.* (1999). Insofar as the crust evolves soil particles scatter and redistribute on the surface (Ben-Dor *et al.*, 2003). This phenomenon has been more associated with the content of silt than of sand, as well as with the effects resulting from the presence of SO_4^{2-} ($1421.3 \text{ meq L}^{-1}$) in the soil. The average value of the $D_{R/S}$ dimension of the g4 crusts is statistically different to groups g1 and g2 (Table 1), partly justifying its position in the spectral response of the soils analyzed (Figure 1a).

In group g3 the relationships set between the $D_{R/S}$ dimension and the red and near NIR regions of the EM spectrum were also significant; as well as that between the $D_{R/S}$ dimension and the hue parameters of the Munsell index and b^* of the CIELAB system, though the value of R^2 in the latter was one of the lowest. In this respect, it may be inferred that the spectral response of the g3 group of crusts is defined mostly by the amount of light reflected on the spectral ranges of the red and NIR regions, associated in turn with the homogeneous structure of the crust, which the color parameters of both systems, subjected to comparison, (Munsell and CIELAB) derive from (Figure 1b). Group g3 has on average a high content of sand among the textural elements compared to the other groups (31.11 %), which allows to assume that this difference resulted in the increase of the spectral response of the corresponding salt crusts (Figure 1b). It has been reported that, sand facilitates light filtration through the soil thanks to a higher concentration of quartz transparent particles, which increases the soil spectral response (Metternicht and Zinck, 2003). In addition, group g3 is characterized for having high contents of MO, Cl^- , and especially

espectral de las costras salinas correspondientes (Figura 1b). Se ha documentado que la arena facilita el paso de luz a través del suelo al presentarse una mayor concentración de partículas transparentes del cuarzo, lo cual aumenta la respuesta espectral del suelo (Metternicht y Zinck, 2003). Además, el grupo g3 se caracteriza por tener altos contenidos de MO, Cl^- , y especialmente NO_3^- (2.9 %, 451.9 y 151.1 meq L^{-1}), presentando los mejores ajustes al modelo de regresión lineal. La presencia del NO_3^- explica en mayor parte las diferencias estadísticas significativas encontradas entre las variables químicas y la dimensión D_w (Cuadro 3).

Para el grupo g5 se encontró una diferencia significativa entre la dimensión $D_{R/S}$ y la energía reflejada en la región verde (con un alto valor de R^2 que indica una tendencia lineal estadísticamente confirmada). Sin embargo, para los parámetros de color valor (6.7) y L^* (68.5) la asociación con $D_{R/S}$ no fue significativa. Estos valores son responsables de una alta respuesta espectral de este grupo de costras, por lo cual es diferente a las demás costras. Se observó que el grupo g5 está formado por un solo matiz cuyas propiedades se asemejan a las del grupo g3 (Figura 1b).

La dimensión $D_{R/S}$ presentó una relación no significativa con el contenido de las partículas de arcilla, así como también la asociación entre la dimensión D_w con el IR cercano fue no significativa (Cuadro 2). Howari *et al.* (2002) observaron que en el espacio poroso de los suelos con texturas más finas se precipitan los cristales de sal más finas, sumándose a las superficies más brillantes en comparación con las del suelo con textura gruesa; además se le atribuye una mayor reflectancia en la región IR cercano. Se concluyó que en el grupo g5 se distinguen tres costras arcillosas y una limo-arcillosa, por lo cual el aumento de la reflectancia y de la brillantez de la costra se debe probablemente a los contenidos superiores de limo y arcilla, de los cuales se deriva el mayor grado del desarrollo de las costras salinas. Para este último grupo de costras (g5), no se observaron diferencias significativas entre la dimensión D_w y la MO, RAS, PSI, SO_4^{2-} y HCO_3^- ; sin embargo, el valor de R^2 de estas variables químicas indica un ajuste lineal entre las variables mencionadas (Cuadro 3).

Además, los bicarbonatos (HCO_3^-) elevan considerablemente la respuesta espectral del suelo en la región VIS (Clark, 1999; Metternicht y Zinck, 2003). Este alto contenido de HCO_3^- (74.2 meq L^{-1}) en el grupo g5, seguido por el grupo g3 (71.7 meq L^{-1}), contribuye al entendimiento de la naturaleza de la respuesta espectral de la reflectancia tan peculiar de los suelos estudiados. Las asociaciones entre las dimensiones fractales y las variables químicas muestran que el grupo

NO_3^- (2.9 %, 451.9 and 151.1 meq L^{-1}), and thus displays the best adjustments to the linear regression model. The presence of NO_3^- largely explains the statistically significant differences found between the chemical variables and the dimension D_w (Table 3).

In group g5 a significant difference was detected between the $D_{R/S}$ dimension and the energy reflected in the green region (with a high value of R^2 that indicates a statistically confirmed linear trend). However, for the color value (6.7) and L^* (68.5) parameters, the association with $D_{R/S}$ was not significant. These values are responsible for a high spectral response by this group of crusts, which makes it different from the other crusts. Group g5 was observed to be formed by one sole hue whose properties are similar to those of group g3 (Figure 1b).

The $D_{R/S}$ dimension registered a non significant relationship with the content of clay particles; also the association between the D_w dimension and NIR was not relevant (Table 2). According to Howari *et al.* (2002), in the porous space of the soils of finer textures, the finer salt crystals precipitate, adding to the brighter surfaces compared to those of the coarse texture soil; also they display greater reflectance in the NIR region. It was concluded that in g5 group, there are three clayey crusts and a silt-clayey one, so the higher reflectance and brightness of the crust are probably due to greater contents of silt and clay, leading to a greater development of salt crusts. In this last group of crusts (g5), no significant differences were observed between the D_w dimension and MO, RAS, PSI, SO_4^{2-} and HCO_3^- ; but the R^2 value of these chemical variables points to a linear adjustment among them (Table 3).

In addition, bicarbonates (HCO_3^-) considerably raise the soil spectral response in the VIS region (Clark, 1999; Metternicht and Zinck, 2003). The high content of HCO_3^- (74.2 meq L^{-1}) in group g5, followed by group g3 (71.7 meq L^{-1}), contributes to understand the nature of the spectral response of the very peculiar reflectance of the soils studied. The associations between the fractal dimensions and the chemical variables show that group g5 is one of the most saline ($\text{CE}=27.2 \text{ dS m}^{-1}$) compared to the other crusts, even though these are better structured and morphologically developed, causing significant changes in their spectral response.

No significant differences were found among the mean values of the crust $D_{R/S}$ fractal dimension corresponding to groups g3 and g5 (Table 1), which partly justifies the need to form the independent groups g1, g2 and g4 (Figure 1) on the basis of their different spectral response. In general, the fine textures where clay prevails are associated with the high values of the $D_{R/S}$ fractal dimensions, as reported for groups g1 and g2. The opposite effect was detected in soils of coarse

g5 es uno de los más salinos ($CE=27.2 \text{ dS m}^{-1}$) comparado con las otras costras, a pesar que estas últimas son mejor estructuradas y desarrolladas morfológicamente lo cual provoca cambios significativos en su respuesta espectral.

No se encontraron las diferencias significativas entre los valores medios de la dimensión fractal $D_{R/S}$ de las costras de los grupos g3 y g5 (Cuadro 1), lo cual justifica en parte la necesidad de formar los grupos independientes g1, g2 y g4 (Figura 1) con base en su diferente respuesta espectral. En general las texturas finas dominadas por la arcilla se asocian a los altos valores de dimensiones fractales $D_{R/S}$ como se documentó para los grupos g1 y g2. El efecto contrario se observó para los suelos con texturas gruesas (arena y limo) que se caracterizaron por los valores menores de la dimensión $D_{R/S}$ típicos para los grupos g3, g4 y g5 (Cuadro 1).

CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó a la búsqueda de las asociaciones entre la rugosidad de las firmas fractales (FER) de los espectros de reflectancia de un suelo salino sódico del ex Lago de Texcoco y sus propiedades fisicoquímicas. Con el propósito de diseñar una nueva tecnología de bajo costo y alta precisión del monitoreo de la salinización de suelos a partir de las FER, la dimensión fractal (D) de las costras salinas estudiadas resultó ser una medida cuantitativa de la naturaleza integral de su estructura así como un descriptor adecuado del comportamiento fractal de las FER. La comparación de la dimensión fractal con los espectros de reflectancia del rango visible e infrarrojo cercano, realizada mediante el análisis multivariado, permitió construir un esquema jerárquico de agrupamiento entre las partículas elementales del suelo (textura) y sales. La nueva clasificación se propone como una viable alternativa para clasificar las costras salinas a través de las FER. La información extraída de su análisis es estadísticamente representativa de la rugosidad de las costras, confirmando su invariancia al escalado y por ende su naturaleza fractal. La composición química y algunos atributos físicos de las costras se correlacionan con la dimensión fractal significativamente.

El análisis estadístico de regresión simple resultó útil para establecer las asociaciones entre FER y algunas propiedades físicas y químicas de los grupos salinos. La asociación lineal entre la dimensión de reescalado ($D_{R/S}$) y los cinco grupos de costras formados con base en sus respuestas espectrales fue alta y significativa estadísticamente. La dimensión $D_{R/S}$ fue más precisa para discriminar entre las estructuras salinas en comparación con la dimensión de ondoletas (D_w).

textures (sand and silt) characterized by values below the $D_{R/S}$ dimension typical of groups g3, g4 and g5 (Table 1).

CONCLUSIONS

The present study focused on the search of associations between the roughness in the reflectance spectra fractal signatures (FER) of a sodium saline soil located in the ex-Lago de Texcoco and their physicochemical properties. With the purpose of designing a low-cost technology and a highly accurate monitoring of soil salinity as of FER, the fractal dimension (D) of the salt crusts studied turned out to be a quantitative measure of the integral nature of its structure, as well as an appropriate descriptor of the fractal behavior of FER. The comparison of the fractal dimension with the reflectance spectra of the visible and near infrared ranges - conducted using the multivariate analysis - allowed to build a hierarchical grouping plan of the soil elementary particles (texture) and salts. The new classification is put forward as a viable alternative to classify salt crusts through FER. The information obtained from the analysis is statistically representative of the roughness of crusts, confirming its invariance to scaling and thus its fractal nature. The chemical composition and some physical attributes of crusts are significantly correlated with the fractal dimension.

The statistical analysis of simple regression proved useful to establish associations between FER and some physical and chemical properties of saline groups. The linear association between the rescaling dimension ($D_{R/S}$) and the five groups of crusts, formed as a result of their spectral responses, was high and statistically significant. The $D_{R/S}$ dimension was more accurate to discriminate among saline structures compared to the wavelet dimension (D_w). However, both techniques are recommended for the measurement of salt crust roughness and its various attributes.

End of the English version—



Sin embargo, ambas técnicas son recomendadas para medir de los atributos de la rugosidad de las costras salinas estudiadas.

LITERATURA CITADA

- Barrett, L. R. 2002. Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils *Geoderma* 108: 49-77.
- Ben-Dor, E., J. R. Irons, and G. Epema. 1999. Soil reflectancia. In: Rencz, A. N., and R. A. Ryerson (eds). *Remote Sensing for the*

- Earth Sciences, Manual of Remote Sensing. John Wiley & Sons, Interscience. pp: 111-188.
- Ben-Dor, E., N. Goldshleger, Y. Benyamini, M. Agassi, and D.G. Blumberg. 2003. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2 to 2.5 μm spectral region. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 289-299.
- Benoit. 2006. Benoit fractal analysis systems. Version 1.3. Trusoft International Interscience.
- Bouyoucos, G. S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soils by hydrometer method. *Soil Sci.* 4: 225-228.
- Bryksina, N. A., and W. Last. 2005. Fractal analysis of the gray-scale intensity data of finely laminated sediments from bainbridge crater lake, Galápagos. *Mathematical Geol.* 37: 327-335.
- Clark, R. N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals and Principles of Spectroscopy. In: Rencz, A. N., and R. A. Ryerson (eds). *Remote Sensing for the Earth Sciences, Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Interscience. pp: 1-58.
- Crowley, J. K. 1993. Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from death valley, California. *Remote Sensing Environ.* 44: 337-356.
- Dehaan, R. L., and G. R. Taylor. 2002. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing Environ.* 80: 406-417.
- Dwivedi, R. S. 2001. Soil resources mapping: A remote sensing perspective. *Remote Sensing Rev.* 20: 89-122.
- Etchevers, J. D. 1992. Manual de métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad de Suelos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 803 p.
- Freud, J. E. 1992. *Mathematical Statistics*. 5 ed. Prentice Hall. New York. pp: 314-317.
- Howari, F. M., P. C. Goodell, and S. Miyamoto. 2002. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. *J. Environ. Quality* 31: 1453-1461.
- Hubbard, B. E., J. K. Crowley, and D. R. Zimelman. 2003. Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4-2.4 μm) Hyperion, ALI, and ASTER Imagery. *IEEE, Trans. on Geosci. and Remote Sensing* 41: 1401-1410.
- Hummel, J. W., K. A. Sudduth, and S. E. Hollinger. 2001. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Computers and Electronics in Agric.* 32: 149-165.
- Jackson, R. D., T. R. Clarke, and M. S. Moran. 2003. Bidirectional calibration results for 11 spectralon and 16 BaSO₄ reference reflectance panels. *Remote Sensing Environ.* 40: 231-239.
- Lawson, A. B., and D. G. T. Denison. 2002. *Spatial Cluster Modelling*. Chapman Hall/CRC Boca Raton. London. 287 p.
- Mandelbrot, B. B. 2002. *Gaussian Self-Affinity and Fractals*. Springer Verlag. Berlin. 654 p.
- Metternicht, G. I., and J. A. Zinck. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing Environ.* 85: 1-20.
- Oleschko, K., B. Figueroa, M. E. Miranda, M. A. Vuelvas, and R. E. Solleiro. 2000. Mass fractal dimensions and some selected physical properties of contrasting soils and sediments of México. *Soil & Tillage Res.* 55: 43-61.
- Oleschko, K., J. F. Parrot, G. Ronquillo, S. Shoba, G. Stoops, and V. Marcelino. 2004. Weathering: toward a fractal quantifying. *Mathematical Geol.* 36: 607-627.
- Pachepsky, Y., D. E. Radcliffe, and H. M. Selim. 2003. *Scaling Methods in Soil Physics*. CRC Press Boca Raton. London. 434 p.
- Panahi, A., and Q. Cheng. 2004. Multifractality as a measure of spatial distribution of geochemical patterns. *Mathematical Geol.* 36: 827-846.
- Post, D. F., A. Fimbres, A. D. Matthias, E. E. Sano, L. Accioly, A. K. Batchily, and L. G. Ferreira. 2000. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1027-1034.
- Richards, L. A. 1985. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 6a ed. Limusa. México. 172 p.
- Sánchez-Marañón, M., M. Soriano, M. Melgosa, G. Delgado, and R. Delgado. 2004. Quantifying the effects of aggregation, particle size and components on the color of Mediterranean soils. *Eur. J. Soil Sci.* 55: 551-565.
- Schmid, T., M. Koch, and J. Gumuzzio. 2005. Multisensor approach to determine changes of wetland characteristics in semiarid environments (Central Spain). *IEEE, Trans. on Geosci. and Remote Sensing* 43: 2516-2525.
- SRH (Secretaría de Recursos Hídricos). 1971. Estudio Agrológico Especial del ex-Lago de Texcoco, Estado de México. Series de estudios, Núm. 2. 145 p.
- Stokman, H. M. G., Th. Gevers, and J. J. Koenderink. 2000. Color measurement by imaging spectrometry. *Computers Vision and Image Understanding* 79: 236-249.
- Sumner, M. E., and R. Naidu. 1998. *Sodic Soils. Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*. University of Oxford. New York. 207 p.
- Szabolcs, I. 1979. Review of Research on Salt-Affected Soils. United Nations Educational Scientific and Culture Organization (UNESCO). Paris. 137 p.
- Taylor, G. R., A. H. Mah, F. A. Kruse, K. S. Kierein-Young, R. D. Hewson, and B. A. Bennett. 1996. Characterization of saline soils using airborne radar imagery. *Remote Sensing Environ.* 57: 127-142.
- Viscarra, R. R. A., D. J. J. Walvoort, A. B. McBratney, L. J. Janik, and O. J. Skjemstad. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131: 59-75.
- Walkley, A., and T. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Walpole, R. E., R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye. 2002. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 7 ed. Prentice Hall. 730 p.