

IDENTIFICACIÓN DE VERTISOLES DE ORIGEN SEDIMENTARIO A TRAVÉS DE SU FIRMA ESPECTRAL*

IDENTIFICATION OF VERTISOLS OF SEDIMENTARY ORIGIN THROUGH THEIR SPECTRAL SIGNATURE

Erasto Sotelo Ruiz^{1§}, María del Carmen Gutiérrez Castorena¹, Carlos Alberto Ortiz Solorio¹, Gustavo Cruz Bello² y Miguel Ángel Segura Castruita³

¹Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Km. 35.5 carretera México-Texcoco. 56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México. ²CENID COMEF, INIFAP. ³ITA No. 10. Torreón, Coahuila. [§]Autor para correspondencia: sotelo@colpos.mx

RESUMEN

La clasificación de suelos es costosa y tardada, por ello es necesario buscar métodos alternativos para realizar esta actividad. Las imágenes de satélite se emplean para identificar los suelos, con base en la reflectancia de algunas de sus propiedades como: contenido de arcilla, humedad, rugosidad, densidad aparente, color y contenido de materia orgánica. El porcentaje de arcilla y la densidad aparente definen a un suelo Vertisol y las demás propiedades están relacionadas, por eso su estudio conjunto genera un patrón espectral que ayuda a su delimitación en una imagen de satélite. Los objetivos de esta investigación fueron: 1) clasificar y determinar la mineralogía de suelos Vertisoles de origen sedimentario de San Fernando, Tamaulipas, 2) identificar su firma espectral presente en la zona de estudio, 3) determinar las propiedades típicas de los suelos Vertisoles con respecto a la reflectancia en la imagen de satélite y 4) modelar la distribución típica de suelos Vertisoles a través de procedimientos de interpretación de imágenes de satélite. El estudio se llevó a cabo en 25 000 ha del municipio de San Fernando, Tamaulipas, México. Se utilizó una imagen del satélite Landsat 7 ETM+ del 29 de abril de 2002. Los suelos se clasificaron como Vertisoles y Molisoles con el mismo tipo de minerales primarios y secundarios, y diferenciados por su contenido de calcita. Los valores de reflectancia de los suelos fueron estadísticamente diferentes en las bandas

5 y 7. Sin embargo, los suelos no pudieron ser diferenciados por medio de una clasificación supervisada con el método de Máxima Verisimilitud de Idrisi en las imágenes de satélite debido a que los contenidos de calcita >60% y el carbonato de calcio >15% definieron la firma espectral de ambos suelos, Vertisoles y Molisoles.

Palabras clave: Calcita, carbonato de calcio, contenido de arcilla, levantamiento de suelos.

ABSTRACT

Soil classification is expensive and time consuming; therefore, it is necessary to develop alternative methods for this task. The satellite images can be used for identifying the soil class, since some properties such as: clay content, moisture, roughness, bulk density, color, and organic matter content have a characteristic reflectance. The percentage of clay and the bulk density define the Vertisols and the others properties mentioned are also related, for that reason its study in conjunction can generate a spectral pattern that contribute towards its delimitation on a satellite image. The objectives of this research were 1) To classify and determine the mineralogy in Vertisols of sedimentary origin from San Fernando, Tamaulipas, 2) To identify the spectral signature of the Vertisols present in the area of study, 3) To determine the typical properties of the Vertisol soils with respect to

* Recibido: Noviembre de 2005
Aceptado: Agosto de 2006

its reflectance on the satellite image and 4) To model the distribution of the typical Vertisols through methods of satellite image interpretation. The study was carried out in 25 000 ha in the municipality of San Fernando, Tamaulipas, Mexico. The satellite image Landsat 7 ETM+ used was taken on April 29th, 2002. The soils were classified as Vertisols and Mollisols with the same type of primary and secondary minerals, and differentiated by its content of calcite. The reflectance values of the soils were statistically different in the bands 5 and 7. However, the soils could not be differentiated by a supervised classification with the method of Maximum Likelihood of Idrisi in the satellite images, due to the fact that the content of calcite >60% and calcium carbonate >15% defined the spectral signature of both soils, Vertisols and Mollisols.

Key words: Calcite, calcium carbonate, clay content, soils survey.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollar estudios formales de suelos resulta costoso y tardado por la cantidad de trabajo de campo y gabinete requerido (Ortiz y Gutiérrez, 1999) razones que han propiciado la búsqueda de métodos alternativos para realizar estos estudios. La percepción remota es una alternativa ya que determina las características de los objetos mediante mediciones a distancia (Lillesand y Kiefer, 1994). Las imágenes de satélite son el medio para lograr este fin debido a que cada material tiene una reflectancia de energía específica conocida como firma espectral, misma que produce un patrón único (Melesio-Nolasco, 1991); además, proporciona resultados uniformes sobre una escala de alta resolución con mínimo tiempo y esfuerzo (Kali *et al.*, 2003), y abarca grandes extensiones.

Los estudios realizados acerca de reflectancia de los suelos indican que las bandas del infrarrojo 5 y 7, del satélite Landsat (Lillesand y Kiefer, 1994; Ben-Dor, 2002), específicamente de 1550-1750 nm del infrarrojo cercano y de 2080-2350 nm en el infrarrojo lejano (Baumgardner *et al.*, 1985; Ben-Dor, 2002) expresan la mayor manifestación del suelo.

Las propiedades que se estudian en los suelos son: el contenido de materia orgánica, humedad y óxidos de fierro, textura, conductividad eléctrica, densidad aparente, color y rugosidad (Baumgardner *et al.*, 1985; Escadafal *et al.*, 1989; Major *et al.*, 1992; Kali *et al.*, 2003; Fox *et al.*, 2004). Sin

embargo, se desconocen cuantitativamente las relaciones entre las diferentes propiedades físicas y químicas del suelo con su reflectancia (Baumgardner *et al.*, 1985). La calibración de las relaciones entre las propiedades del suelo y la reflectancia proporcionará una herramienta nueva e importante para los científicos de la ciencia del suelo.

Existe la posibilidad de separar los diferentes órdenes de suelos con el uso de imágenes, sobre todo con sensores aeroespaciales (Baumgardner *et al.*, 1983) e inclusive hasta llegar a su clasificación, génesis y levantamiento, utilizando longitudes de onda corta a partir de estudios de reflectancia de los suelos en condiciones controladas de laboratorio (Ben-Dor, 2002). Sin embargo, se carece de investigación en campo e imágenes de satélite, en donde es posible que otros factores influyan en la reflectancia, por ejemplo: la vegetación, pendiente, contenido de humedad, diferente etapa de crecimiento de los cultivos y época de toma de la imagen de satélite.

Los suelos se clasifican con base en sus procesos de formación, de los cuales se derivan sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Soil Survey Staff, 2003). Todos los Órdenes tienen propiedades distintivas; por ejemplo, los suelos Vertisoles se identifican por el contenido de arcilla de tipo 2:1 (>30%), formación de grietas (contenido de humedad), caras de fricción y agregados en forma de cuña en los horizontes superficiales y subsuperficiales (Soil Survey Staff, 2006; IUSS - ISRIC - FAO, 2006). Algunos Órdenes comparten propiedades y procesos por ejemplo, el horizonte Mólico se presenta en Molisoles o Alfisoles; en Vertisoles el horizonte Mólico nunca se presenta.

En México, los Vertisoles ocupan 9.5 millones de ha, representan 4.8% del territorio nacional: 38% y 18% son de agricultura de temporal y de riego, respectivamente (Ortiz, 1997); éstos son unidades puras, es decir, con pocas asociaciones con otros tipos de suelos. Estos suelos se concentran en El Bajío (principalmente en Guanajuato) y en las planicies costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco).

Chen *et al.* (2004) determinaron que en las planicies costeras de Estados Unidos de América se pueden mapear los diferentes contenidos de arcilla de la superficie del suelo (<22%) a través del uso de imágenes de satélite. Por su parte, Escadafal *et al.* (1989) reportaron que en suelos Inceptisoles calcáreos se tiene reflectancia de hasta 75%. Los Vertisoles en Tamaulipas, además de presentar altos contenidos de

arcillas >30%, también se caracterizan por la presencia de altos contenidos de carbonato de calcio >15%; por lo que teóricamente es posible identificar y delimitar estos suelos directamente en campo.

Los objetivos de esta investigación fueron: 1) clasificar y determinar la mineralogía de los suelos Vertisoles de origen sedimentario de San Fernando, Tamaulipas, 2) identificar su firma espectral presente en la zona de estudio, 3) determinar las propiedades típicas de los suelos Vertisoles con respecto a la reflectancia en la imagen de satélite y 4) modelar la distribución de las propiedades típicas de Vertisoles a través de procedimientos de interpretación de imágenes de satélite.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio comprendió 25 000 ha y se localizan en San Fernando, Tamaulipas, México entre los paralelos 25° 13' 22" y 25° 29' 34" N y los meridianos 98° 00' 18" y 98° 06' 23" O. Fisiográficamente está comprendida dentro de la planicie costera con pequeños lomeríos de origen sedimentario, en donde dominan los materiales calcimórficos; el contenido de arcilla alcanza hasta 70% en los planos de inundación y <30% en los lomeríos (INEGI, 1988a). El origen de las arcillas se debe primero a procesos de sedimentación marina (en los planos costeros) y después a la depositación aluvial.

Se realizaron muestreos en campo del 21 al 26 de febrero de 2005, durante la estación seca. Los sitios de muestreo se seleccionaron con base en los mapas edafológicos escala 1:250 000 (INEGI, 1983, 1988a, 1988b). En el mapa se eligieron tres zonas de estudio de 12 cm² cada una; según la clasificación del INEGI, dos zonas presentan suelos Vertisoles y Gleysoles como dominantes y una zona presenta suelos Vertisoles. En total se estudiaron 36 cm² de mapa y se ubicó un sitio de muestreo cada cm²; en el campo se colectó una muestra de suelo de 2 kg de 0 a 30 cm de profundidad en cada sitio de muestreo de mapa; además, se barrenó a través del perfil a una profundidad mayor de 90 cm, con el propósito de verificar y diferenciar los tipos de suelo. Con base en las barrenaciones se excavaron pozos pedológicos y se describieron morfológicamente conforme a la metodología FAO (1990) para trazar los límites de los suelos. En cada perfil se colectaron muestras por horizontes para su posterior análisis en el laboratorio.

Las determinaciones físicas y químicas de los suelos se realizaron con los procedimientos de Van Reeuwijk (1995) y fueron las requeridas para clasificar a los suelos de acuerdo con el Soil Survey Staff (2006). La mineralogía se determinó con base en el análisis de la fracción gruesa (arena) y fina (arcilla). El análisis de la fracción gruesa se realizó para identificar la naturaleza del material parental y la presencia de discontinuidades litológicas. Las partículas gruesas se limpiaron (remoción de agentes cementantes como materia orgánica y carbonato de calcio), se separaron granulométricamente (fracción de 0.5 mm) y se colocaron en un porta objetos utilizando resina, posteriormente se identificaron los minerales en el microscopio petrográfico. El análisis de la fracción arcillosa se realizó para la fracción <2 μm; ésta se separó de las arenas y de los limos a través del método de pipeta, y luego se secó en baño María para obtener polvo seco. El polvo se dispersó a través de agitación magnética y luego se colocaron unas gotas en un porta objeto para su sedimentación y favorecer la orientación de las arcillas, mismas que se identificaron usando un difractor de rayos X.

La imagen de satélite Landsat 7 ETM+ que se empleó para el modelado de los suelos Vertisoles fue la 26/42 del 29 de abril de 2002. Esta imagen tiene una resolución de 30 x 30 m el píxel; consta de siete bandas, las cuales van del visible al infrarrojo térmico; una banda pancromática de 15 x 15 m el tamaño del píxel; un ciclo de 16 días y cobertura de imagen de 185 x 185 km (Lillesand y Kiefer, 1994).

Se determinaron los valores de reflectancia de las diferentes bandas de la imagen de satélite para cada sitio de muestreo; después se realizó una comparación de medias para identificar las bandas donde la reflectancia fue estadísticamente diferente y con éstas se hizo una clasificación supervisada.

Por ser propiedades que definen a los suelos Vertisoles (Soil Survey Staff, 2006) se establecieron tres intervalos de contenido de arcilla: 12.46-30%, 30-50% y 50-72% y densidad aparente: 1.3-1.6 g cm⁻³, 1.6-1.7 g cm⁻³ y 1.7-1.90 g cm⁻³; además, se graficaron los diferentes valores de dichas variables contra la reflectancia espectral para buscar tendencias. También se generaron modelos de regresión para determinar cual propiedad presenta el mayor ajuste y así poder identificar y delimitar a los suelos.

La clasificación supervisada se realizó para determinar la distribución de las propiedades típicas de suelos Vertisoles, para ello se empleó el método de Máxima Verisimilitud

con el fin de delimitar con precisión los diferentes tipos de coberturas, el porcentaje de agrupación que se utilizó fue de 33%. Esta clasificación se realizó con el sistema de información geográfica Idrisi, las parcelas de entrenamiento para cada intervalo fueron por lo menos siete (Eastman, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación y mineralogía

Los suelos identificados en la zona de estudio se clasificaron a nivel de subgrupo como: *Chromic Calciusterts*, Perfiles 1 y 2, y *Typic Calciustoll*, Perfil 3 (Cuadro 1) de acuerdo con el Soil Survey Staff (2003) o como suelos Vertisoles cálcicos y como suelo Calcisol hipercálcico (IUSS - ISRIC - FAO, 2006). Los dos primeros correspondieron a suelos Vertisoles con presencia de más de 30% de arcilla expandible, superficies de deslizamiento y grietas que se abren y se cierran periódicamente; presentan un horizonte cálcico y son los suelos dominantes en la región; el tercero correspondió a suelos Molisoles o Calcisoles, dependiendo del sistema de clasificación. Cada uno de estos suelos presentó diferentes propiedades de absorción y reflexión de la luz, dependiendo del color, contenido de carbonatos de calcio, composición mineralógica, ubicación en el paisaje y geomorfología.

Los *Chromic Calciusterts* son suelos Vertisoles con coloraciones claras y brillantes (10YR5/1 y 10YR5/2 en húmedo y en seco, respectivamente), lo que hace que los suelos reflejen más la luz y por lo tanto sus valores de reflectancia (65% y 58% respectivamente) sean altos, de acuerdo con la escala reportada por Lillesand and Kiefer (1994). Estos suelos se presentan en la parte centro, oriente y norte de la zona de estudio; su material de origen son sedimentos arcillosos, calcáreos y calizas. La mineralogía de la fracción gruesa (arena) es: calcita (64%), cuarzo (34%) y

feldespatos (2%); en tanto que la fracción fina está compuesta por esmectitas, vermiculita, cuarzo, calcita y feldespatos (Figura 1), minerales responsables de aportar los colores claros y brillantes al suelo.

Los *Typic Calciustolls* son suelos ligeramente más desarrollados porque presentan un epipedón mólico y un horizonte subsuperficial cálcico; se localizan en la parte alta de la zona de estudio y se ubican en la zona suroeste. Son suelos con colores pardos (10YR5/3) en seco y negros en húmedo (10YR2/1), de textura media y formados por minerales de colores claros. Su composición mineralógica en la fracción gruesa (arena) es: calcita (88%), cuarzo (10%) y feldespatos (2%); mientras que la fracción fina es: esmectita, cuarzo, calcita, magnetita y goethita. Los altos contenidos de carbonato de calcio confieren a estos suelos valores de reflectancia de hasta 86%.

Dixon y Weed (1989) señalaron que los suelos arcillosos se forman por intemperismo *in situ* del material o por procesos aluviales donde las arcillas, predominantemente esmectitas, son transportadas a los planos de inundación con pendientes suaves, donde se depositan. Este último es el proceso característico de los suelos de la zona debido a que presentan un comportamiento irregular en los porcentajes de carbón orgánico, arcilla y carbonatos de calcio con respecto a la profundidad, lo que evidencia su origen aluvial.

De acuerdo con Porta *et al.* (2003), las rocas sedimentarias del tipo de las calizas forman suelos de colores claros aunque tengan alto contenido de esmectitas (Cuadro 1). Esto explica porque la cantidad de energía reflejada de los suelos está más relacionada con el contenido de carbonato de calcio que con el tamaño de partícula; por ejemplo, en suelos con más de 65% de arcilla se esperaría una reflectancia menor de 30% tal como lo reportaron Escadafal *et al.* (1989).

Escadafal *et al.* (1989) encontraron que los suelos Inceptisoles (con 97% de carbonato de calcio y 89% de arena) alcanzan valores de reflectancia entre 50 y 70%.

Cuadro 1. Clasificación en tipo de suelo con base en sus diferentes propiedades y contenidos cuantitativos. San Fernando, Tamaulipas, México.

Perfil	Tipo de suelo	CO (%)	CaCO ₃ (%)	Arcilla (%)	Arena (%)	Calcita (%)	Cuarzo (%)	Feld. (%)	Reflectancia (%)
									B-5
1	<i>Chromic Calciusterts</i>	1.1	23.4	65.4	13.3	64	34	2	65
2	<i>Chromic Calciusterts</i>	1.1	15.2	67.7	12.5	56	40	4	58
3	<i>Typic Calciustoll</i>	1.5	30.4	33.3	37.2	88	10	2	86

CO= Carbón orgánico; CaCO₃= Carbonato de calcio; Feld.= Feldespatos; B= Banda.

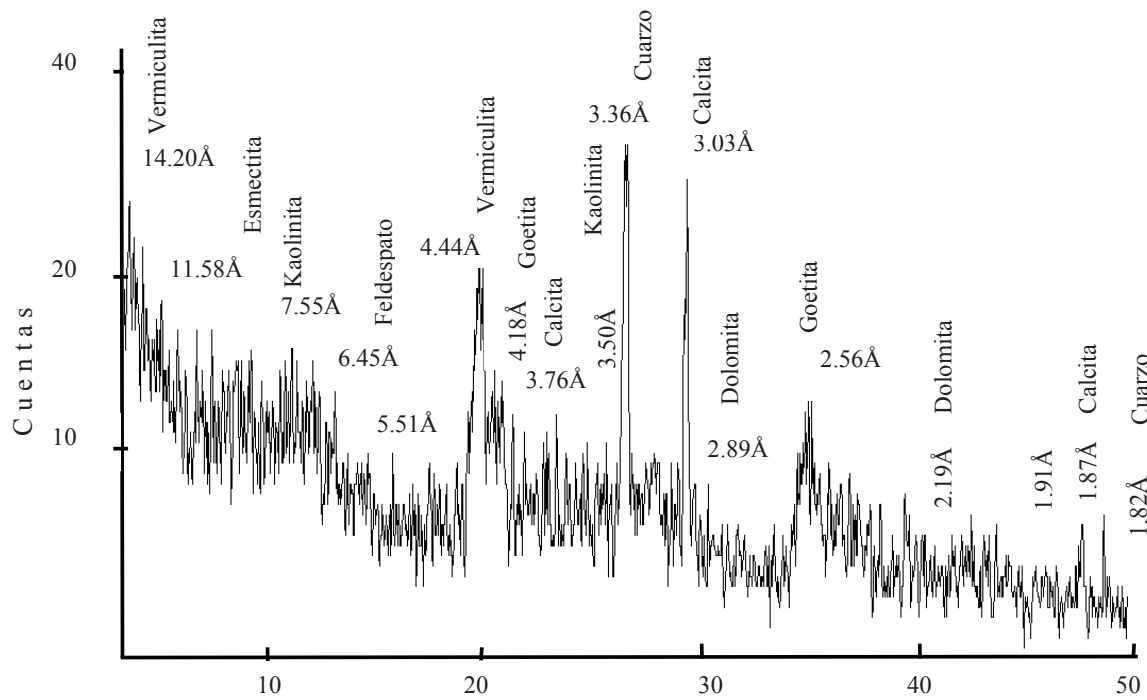


Figura 1. Composición mineralógica, donde se observan los valores de los diferentes minerales presentes en el suelo del perfil uno de la zona de estudio de San Fernando, Tamaulipas, México.

Estos valores son similares a los obtenidos en los suelos estudiados, lo cual significa que no se pueden separar suelos a nivel de Orden, porque el carbonato de calcio enmascara a otros horizontes como el Mólico o a propiedades de suelos Vertisoles determinantes en su clasificación. Asimismo, a pesar de que la zona estudiada es una planicie costera donde los suelos Vertisoles son dominantes, no se puede realizar una delimitación de suelos como lo estableció Chen *et al.* (2004).

Firmas espectrales

La firma espectral de suelos Vertisoles y Molisoles se presenta en los Cuadro 2 y 3; estos suelos no se pudieron diferenciar en todas las bandas analizadas debido a que las firmas espectrales se traslaparon, aunque en algunos casos el traslape fuera mínimo; por ejemplo, las bandas 5 y 7 sólo se traslapan 23% y 24% respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Firmas espectrales de suelos Vertisoles en la zona de San Fernando, Tamaulipas, México.

Banda	% Reflectancia	Firma	Media	D. E.	Media -ó+ D. E.
1	42-52	106-133	122.3	7.9	114-130
2	33-48	84-122	104.7	9.6	95-114
3	36-55	92-139	118.9	13.8	105-133
4	20-38	52-98	77.4	9.4	68-87
5	58-94	147-239	191.5	18.7	173-210
7	42-81	107-206	151.1	21.1	130-172

D. E.= Desviación estándar.

Cuadro 3. Firmas espectrales de suelos Molisoles en la zona de San Fernando, Tamaulipas, México.

Banda	% Reflectancia	Firma	Media	D. E.	Media -6+ D. E.
1	44-51	113-131	121.3	9.1	112-130
2	42-47	108-119	114.7	5.9	109-121
3	51-55	130-141	136.0	5.6	130-142
4	32-36	82-91	86.0	4.6	81-91
5	86-91	218-233	226.0	7.5	219-234
7	71-75	180-190	185.3	5.0	180-190

D. E.= Desviación estándar.

Las diferencias en la firma espectral se debieron al tamaño de partículas, las cuales fueron finas en suelos Vertisoles o gruesas en suelos Molisoles. Los altos contenidos de arcilla hacen que los suelos absorban mayor cantidad de luz y por lo tanto, sus valores de reflectancia sean menores (Cuadro 3). La disminución de los valores de la banda 5 y 7, estuvo relacionada con las bandas del infrarrojo al infrarrojo lejano, donde la reflectancia empieza a disminuir (Lillesand y Kiefer, 1994).

Con el propósito de buscar diferencias significativas se realizó una comparación de medias de los valores de reflectancia; ésta resultó estadísticamente diferente en las bandas 5 y 7, donde los suelos Molisoles y Vertisoles se pueden diferenciar. Sin embargo, cuando se realizó la clasificación supervisada con el propósito de delimitar estos suelos, los mapas resultaron imprecisos, lo anterior se debió a que los modelos estadísticos explicaron solamente 21% en la banda 5 y 17% en la banda 7. Ben-Dor (2002) y Baumgardner *et al.* (1985) reportaron que algunas propiedades de suelos como: contenido de humedad, color, materia orgánica, textura y óxidos de hierro pueden ser predichas en la banda 7 que corresponde a la región espectral de 2080-2350 nm,

lo cual puede ser válido siempre y cuando los suelos no presenten alto contenido de calcio.

Análisis de las propiedades

En el Cuadro 4 se presentan los intervalos del porcentaje de arcilla y densidad aparente de los suelos estudiados, los cuales se establecieron según la clasificación de suelos y por intervalos con aplicación práctica (Porta *et al.*, 2003; Soil Survey Staff, 2003). En el Cuadro 4 se observa que conforme se incrementan los porcentajes de arcilla, los valores de reflectancia disminuyen en la banda 7.

Escadafal *et al.* (1989) determinaron que la cantidad de calor absorbido por un suelo varía por el tipo de suelo y el tamaño de partícula; los suelos arcillosos tienden a absorber más calor que los suelos arenosos, en tanto los suelos arenosos reflejan más la luz por lo que presentan menor temperatura.

En cuanto a la distribución de los valores de reflectancia según el porcentaje de arcilla de los suelos, en la banda 5 la reflectancia se concentró de 67-81% (intervalo de 35)

Cuadro 4. Intervalos de los contenidos de arcilla y densidad aparente de los suelos en el área de estudio y sus valores de reflectancia en la imagen Landsat 7 ETM+ del 29 de abril de 2002.

Variable	Intervalo	Reflectancia (%)	
		Banda 5	Banda 7
Porcentaje de arcilla	12.46-30.00	58	75
Porcentaje de arcilla	30.00-50.00	68-75	62-65
Porcentaje de arcilla	50.00-72.00	76-81	59-62
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.30-1.60	67-78	55-62
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.60-1.70	78-81	62-65
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.70-1.90	89-91	69-75

en 79% de los sitios; en tanto, en la banda 7 la reflectancia fue de 52-71% (intervalo de 48) en el 74% de los puntos de muestreo (Figura 2).

La mayoría de los puntos muestreados presentaron contenidos de arcilla >34% para ambas bandas. Aparentemente estos intervalos son estrechos y permitirían separar a los suelos por sus contenidos de arcilla; sin embargo, cuando se analizaron con respecto a la reflectancia se observó que son indiferentes a los contenidos de arcilla, ya que todos los puntos presentaron reflectancia similar (alrededor de 78%).

Estos resultados difieren de lo reportado por Chen *et al.* (2004) y por Sorensen y Dalsgaard (2005) quienes encontraron que los contenidos de arcilla (<22% y <26%, respectivamente) se pueden estratificar y delimitar en un

mapa por medio de un sistema de información geográfica, debido a que encontraron correlaciones de hasta 83% entre la arcilla y la reflectancia de los suelos.

En el caso de la densidad aparente, los valores que se obtuvieron variaron de 1.3 g cm⁻³ a 1.99 g cm⁻³, aunque el mayor número de sitios muestreados se concentró en 1.5 g cm⁻³ (Figura 3). Si bien esta propiedad está inversamente relacionada con la reflectancia, los valores se concentraron en 78%.

Como se observa en la Figura 3, los valores de la densidad aparente en la banda 5 muestran que la reflectancia se concentró de 67-81% (intervalo de 35) en 79% de los puntos muestreados y en la banda 7, los valores de la reflectancia se concentraron de 52-71% (intervalo de 48) en 74% de los sitios. A pesar de que los intervalos fueron

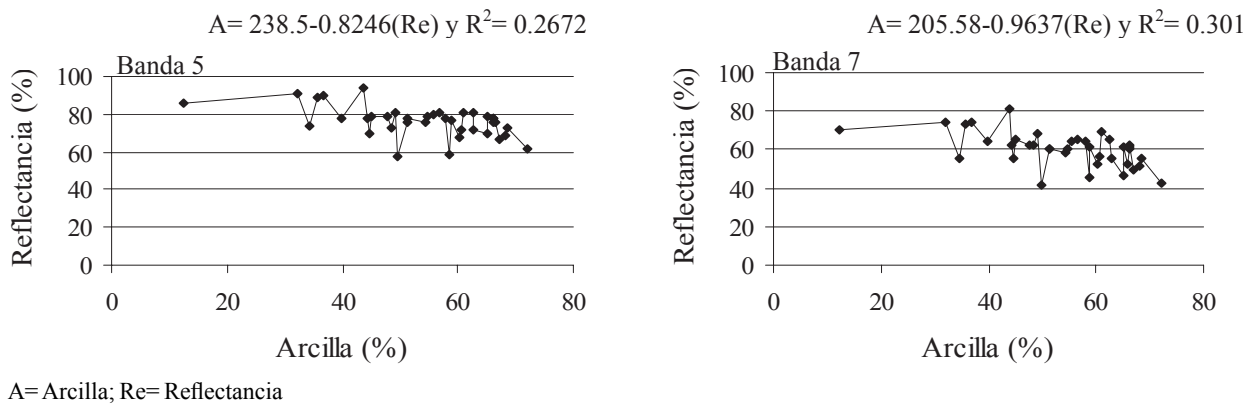


Figura 2. Reflectancia de los suelos en San Fernando, Tamaulipas, México, según el porcentaje de arcilla de las bandas 5 y 7, de la imagen Landsat 7 ETM+ de 2002.

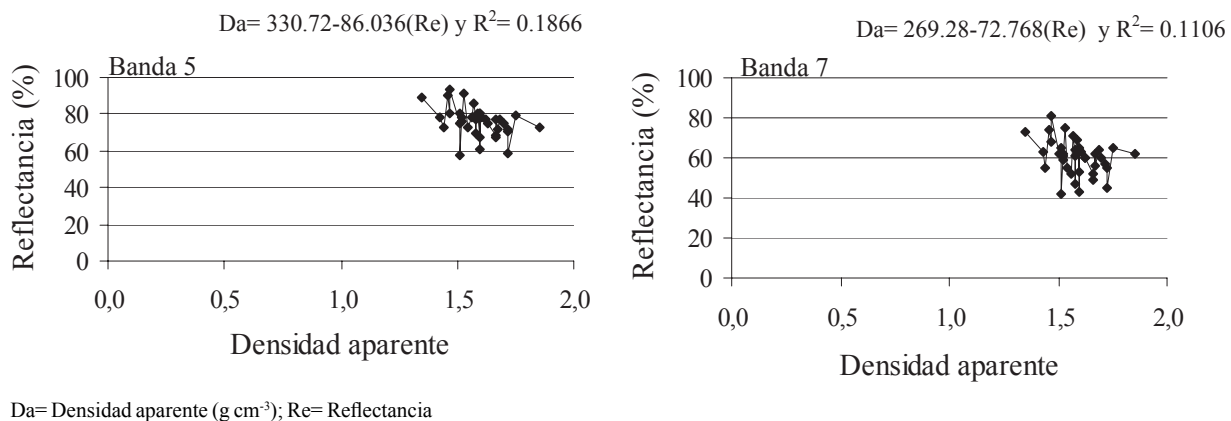


Figura 3. Reflectancia de los suelos en San Fernando, Tamaulipas, México, según la densidad aparente en las bandas 5 y 7, imagen Landsat 7 ETM+ de 2002.

estrechos, los modelos estadísticos sólo explicaron 18 y 11%, respectivamente.

Modelado de las imágenes de satélite

La delimitación de los suelos (Vertisoles y Molisoles) fue imposible con los métodos de Máxima Verisimilitud, Mínima Distancia y Paralelepípedo de la clasificación supervisada en forma directa; tampoco se logró con la reagrupación de las propiedades del suelo, basada en el supuesto de que los suelos Vertisoles son más arcillosos y duros, y los suelos Molisoles más arenosos y suaves, es decir; >30% de arcilla y >1.6 g cm⁻³ de densidad aparente para suelos Vertisoles y <30% de arcilla y <1.6 g cm⁻³ de densidad aparente para suelos Molisoles (Figura 4).

Al delimitar sobre la imagen de satélite las propiedades mencionadas para suelos Vertisoles y Molisoles, en ambos casos correspondieron en campo con suelos Vertisoles (áreas identificadas en gris). Por lo tanto, se dedujo que la delimitación de los suelos tuvo baja precisión, debido a que los límites y distribución de los suelos en la imagen de satélite no coincidieron con la delimitación en campo (Figura 5).

CONCLUSIONES

Los suelos dominantes en la zona de estudio se clasificaron como Vertisoles (*Chromic Calciusterts*) y Molisoles (*Typic Calciustolls*).

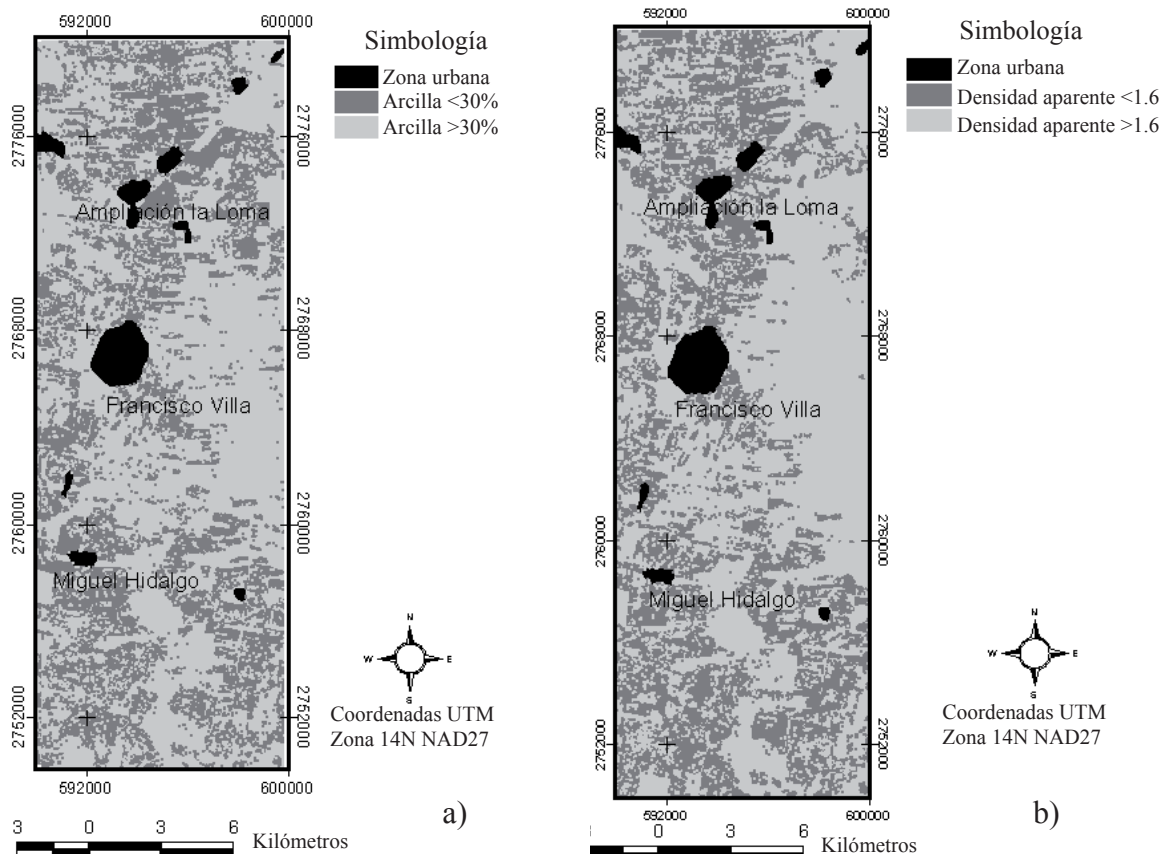


Figura 4. Distribución de los diferentes intervalos de arcilla (a) y densidad aparente (b) resultantes con el método de Máxima Verisimilitud con las bandas 5 y 7 de la imagen Landsat 7 ETM+.

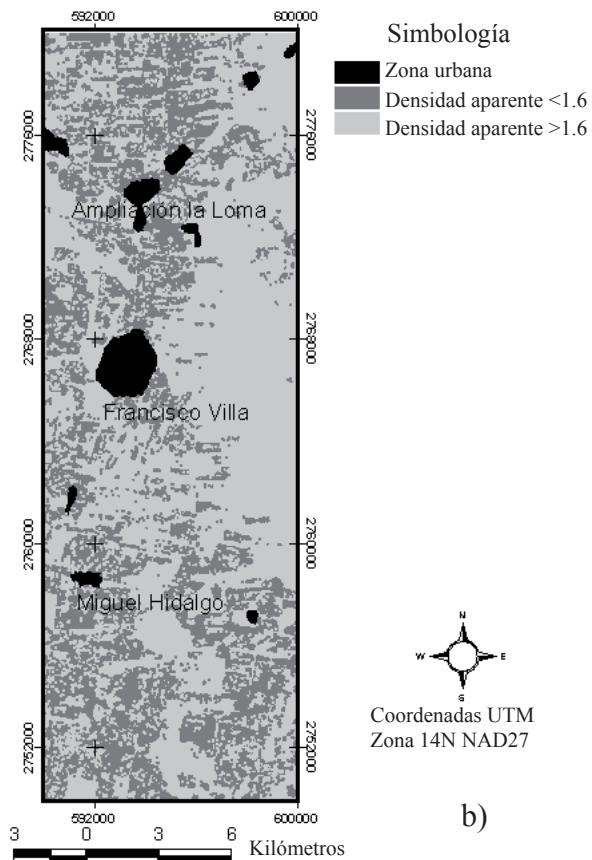


Figura 5. Suelos delimitados en campo y clasificados con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de 1999.

Los porcentajes de arcilla y la densidad aparente no permitieron identificar a los suelos Vertisoles de origen sedimentario de la zona de estudio en la imagen de satélite Landsat 7 ETM+ debido a que presentaron baja relación con la reflectancia, lo que impidió una separación adecuada de la firma espectral. Los altos contenidos de carbonato de calcio en el suelo del área de estudio provocaron alta reflectancia, enmascarando la reflectancia espectral de sus propiedades características.

LITERATURA CITADA

- Baumgardner, M. F.; Crosson, P. R.; Dregner, H.; Drosdoff, M. and Westin, F. C. 1983. Resource inventory and baseline study methods for developing countries. *In*: Conant, F.; Rogers, P.; Baumgardner, M.; McKell, C.; Dasmann, R. and Reining, P. (eds.). Amer. Assoc. Adv. Sci. 83-3. Washington, D. C., USA. p. 187-305.
- Baumgardner, M. F.; Silva, L. F.; Biehl, L. L. and Stoner, E. R. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38:1-44.
- Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.* 75:173-243.
- Chen, F.; Kissel, D.; West, L. T.; Clark, R.; Rickman, D.; Luvall, J. and Adkins W. 2004. Field scale mapping of surface soil clay concentration. *Precis. Agric.* 5:3-22.
- Dixon, J. B. and Weed, S. B. 1989. Minerals in soil environments. 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 863 p.
- Eastman, J. R. 2001. Idrisi. Versión 1.32.2. Manual del usuario. Clark Labs, The Idrisi Project. Clark University, USA. 960 p.
- Escadafal, R.; Girard, M. C. and Courault, D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM Data. *Remote Sens. Environ.* 27:37-46.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 1990. Guideline for soil profile description. 3rd ed. (revised). Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. Rome, Italy. 80 p.
- Fox, A. G.; Sabbagh, G. J.; Searcy, S. W. and Yang, C. 2004. An automate soil line identification routine for remotely sensed images. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1326-1331.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983. Linares G14-11. Carta Edafológica 1:250, 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1988a. Atlas nacional del medio físico. Primera reimpresión. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F. 224 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1988b. Síntesis geográfica de Tamaulipas. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F. 198 p.
- International Union of Soil Science - International Soil Reference and Information Center and Food and Agriculture Organization of the United Nations. (IUSS - ISRIC and FAO). 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd edition. Rome, Italy. 114 p. (World soil resources reports No. 103.).

- Kali, E. S.; Olmanson, L. G.; Heinert, N. J.; Brezonik, P. L. and Bauer, M. E. 2003. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sens. Environ.* 88:144-156.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. 3rd ed. John Wiley. New York, USA. 721 p.
- Major, D. J.; Janzen, H. H.; Olson, B. M. and McGinn, S. M. 1992. Reflectance characteristic of southern Alberta soils. *Can. J. Soil Sci.* 72:611-615.
- Melesio-Nolasco, S. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. Apuntes del curso satélites y agricultura: el ejemplo SPOT. *In: Sorani, V.; Cajuste, L. y Ojeda, E. (eds.)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. p. 2-19.
- Ortiz S., C. A. 1997. Estudio de suelos a nivel nacional. Carta Edafológica escala 1:1' 000, 000. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 82 p.
- Ortiz S., C. A. y Gutiérrez C., Ma. del C. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad de Edafología. Montecillo, Estado de México, México. 104 p.
- Porta C., J.; López-Acevedo, M. R. y Roquero C., D. 2003. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. 3a. ed. Ediciones Mundi-Prensa. México. 929 p.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. USA. 333p.
- Sorensen, L. K. and Dalsgaard, S. 2005. Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:159-167.
- Van Reeuwijk, L. P. 1995. Procedures for soil analysis. 4th ed. ISRIC. Wageningen, Netherlands. 145 p. (Tech. Pap. No. 9).