

DELIMITACIÓN DE VERTISOLES A TRAVÉS DE LA IDENTIFICACIÓN DE SUS FIRMAS ESPECTRALES CON EL USO DE IMÁGENES LANDSAT TM

Delimitation of Vertisols through Identification of their Spectral Signatures with the Use of Landsat TM Images

E. Sotelo R.^{1‡}, M. del C. Gutiérrez C.¹, C. A. Ortiz S.¹, G. Cruz B.² y M. A. Segura C.³

RESUMEN

Los levantamientos formales de suelos son costosos y tardados, por lo que es necesario encontrar métodos alternativos para realizarlos. Los sensores remotos se pueden emplear para identificar y delimitar algunas propiedades de los suelos, ya que algunas de ellas tienen una reflectancia característica, como contenido de arcilla, humedad, rugosidad, densidad aparente, color y materia orgánica. Dos de estas propiedades, porcentaje de arcilla y densidad aparente, definen a un Vertisol y las demás están relacionadas con éste, lo cual sugiere que estudiarlas en conjunto puede generar un patrón espectral que ayude a delimitarlo en una imagen de satélite. Los objetivos fueron: 1) identificar y clasificar los Vertisoles y determinar su mineralogía; 2) relacionar las propiedades típicas de los suelos con la reflectancia espectral de las imágenes Landsat TM; y 3) delimitar a los Vertisoles con base en sus propiedades típicas a través de procedimientos de percepción remota. El estudio se llevó a cabo en Guanajuato, México. La zona de estudio comprendió 30 000 ha. Se utilizó una imagen de satélite Landsat TM del 29 de abril de 2002. Los suelos se clasificaron como: Chromic Haplusterts, Typic Haplusterts y Mollic Ustifluvents. Las propiedades que presentaron una mayor precisión y se relacionan con la reflectancia espectral fueron el porcentaje de arcilla y la densidad aparente; sin embargo, los Vertisoles no presentan un patrón espectral único, por lo que no se pueden delimitar cartográficamente con imágenes de satélite.

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (sotelo@colpos.mx)

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F.

³ Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Torreón, Coahuila, México.

Recibido: junio de 2005. Aceptado: junio de 2007.
Publicado en Terra Latinoamericana 25: 223-230.

Palabras clave: patrón espectral, propiedades típicas, máxima verisimilitud, región espectral.

SUMMARY

The formal soil surveys are expensive and time-consuming, making it necessary to find alternative methods. Remote sensors can be used since some properties of the soil have a characteristic reflectance: clay content, humidity, roughness, bulk density, color, and organic matter. Two of these properties, percentage of clay and bulk density define a Vertisol and the others are related, suggesting that their joint study can generate a spectral pattern that helps to delimit these soils on a satellite image. The objectives were 1) to identify and classify Vertisols and determine their mineralogy; 2) to relate typical properties of the soils with spectral signatures of Landsat TM images; and 3) to delimit Vertisols on the basis of their typical properties with remote sensing procedures. The study was carried out in Guanajuato, Mexico. The study area comprises 30 000 ha. The Landsat TM satellite image that was used was that of April 29, 2002. The soils were classified as Chromic Haplusterts, Typic Haplusterts and Mollic Ustifluvents. The variables that were most precise and were related to spectral reflectance were percentage of clay and bulk density; however, Vertisols do not present spectral unique signatures, therefore, they can not be delimited cartographically with Landsat TM images.

Index words: spectral pattern, typical properties, maximum likelihood, spectral region.

INTRODUCCIÓN

Llevar a cabo levantamientos formales de suelos resulta costoso y tardado, por la cantidad de trabajo de campo y gabinete requerido (Ortiz y Gutiérrez, 1999); debido a lo anterior, es necesario encontrar otros métodos para realizar este tipo de estudios. Los sensores remotos

son una alternativa para lograr este fin, ya que proporcionan resultados uniformes sobre una escala local de alta resolución, con mínimo tiempo y esfuerzo (Sawaya *et al.*, 2003); además, permiten determinar las características de los objetos mediante mediciones a distancia, sin el contacto con los mismos (Lillesand y Kiefer, 1994), debido a que cada material tiene una reflectancia de energía específica, conocida como firma espectral, la cual produce un patrón único (Melesio-Nolasco, 1991).

La reflectancia del suelo se puede obtener en laboratorio o *in-situ* y medir la respuesta espectral en las regiones ultravioleta, visible y partes del infrarrojo del espectro. La reflectancia de los suelos es función de algunas de sus propiedades, como son: contenido de materia orgánica, humedad, textura, contenido de óxidos de hierro, conductividad eléctrica, densidad aparente, color y rugosidad (Swain y Davis, 1978; Escadafal *et al.*, 1989; Major *et al.*, 1992).

De acuerdo con Baumgardner *et al.* (1985) y Ben-Dor *et al.* (1999), la región del espectro donde se refleja el suelo y se puede diferenciar entre unidades es la de 0.4 a 1.1 μm (visible/infrarrojo cercano) y de 1.1 a 2.5 μm (longitud de onda corta del infrarrojo). Sin embargo, no se han establecido cuantitativamente las relaciones entre las diferentes propiedades físicas y químicas con la reflectancia del suelo (Baumgardner *et al.*, 1985). Es posible separar diferentes Órdenes de suelos con el uso de imágenes, sobre todo con sensores aeroespaciales (Baumgardner *et al.*, 1985), inclusive hasta llegar a clasificarlos utilizando longitudes de onda corta (Ben-Dor *et al.*, 1999). No obstante, diversos autores sólo han estudiado los suelos para identificar y delimitar propiedades, sin hacer referencia al tipo de suelo (Baumgardner *et al.*, 1985; Escadafal *et al.*, 1989; Major *et al.*, 1992; Sawaya *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2004; Fox *et al.*, 2004). Si las relaciones entre la reflectancia y las propiedades del suelo se calibran, esto puede proporcionar una nueva e importante herramienta para los científicos de la Ciencia del Suelo.

Los tipos de suelos se designan con base en sus procesos de formación, de los cuales se derivan sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Soil Survey Staff, 2006). Algunos suelos comparten propiedades y procesos; por ejemplo, el horizonte Mólico se caracteriza por propiedades como: materia orgánica, consistencia suelta, saturación de bases, retención de humedad alta, color oscuro y profundidad; se puede presentar en Feozems, Castañozems, Chernozems,

Solonetz, Andosols, etc. (IUSS-ISRIC-FAO, 2006), lo que hace que el análisis de su reflectancia sea más complejo. Sin embargo, algunos suelos se caracterizan con menor número de propiedades; por ejemplo, los Vertisoles, que se identifican principalmente por el contenido de arcilla de tipo 2:1 ($> 30\%$) y la formación de grietas (contenido de humedad), además de otros rasgos (caras de fricción y agregados en forma de cuña) que están en los horizontes subsuperficiales (Soil Survey Staff, 2006; IUSS-ISRIC-FAO, 2006).

En México, los Vertisoles ocupan 38 y 18% de la superficie destinada a la agricultura de temporal y de riego, respectivamente (Ortiz, 1997) y son unidades casi puras, es decir, con pocas asociaciones con otro tipo de suelos.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) identificar y clasificar los Vertisoles y determinar su mineralogía, 2) relacionar las propiedades típicas de los suelos con la reflectancia espectral de las imágenes Landsat TM, y 3) delimitar a los Vertisoles, con base en sus propiedades típicas, a través de procedimientos de percepción remota.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localizó entre 20° 30' 57" y 20° 36' 34" N y 100° 49' 20" y 101° 06' 40" O en Celaya, Guanajuato, México. Esta zona cubrió una superficie de 30 000 ha. Las geoformas que dominan en la zona de estudio son, principalmente, volcanes de tamaño de lomerío (cerrito Colorado, cerro Mandingo, cerro Grande, cerro Culiacán y cerro Gordo) y valles. Los volcanes presentan diferente material, de acuerdo con la pendiente: cerca de los cráteres dominan las brechas volcánicas, en la parte intermedia y hasta el inicio de la parte plana, los basaltos; en la parte baja, los materiales aluviales formados a partir de rocas ígneas extrusivas básicas y ácidas (INEGI, 1988; 1995; 1996a; 1996b).

Se seleccionaron tres sitios de muestreo (de 16 cm cada una, dando un total de 48 puntos), con base en un mapa edafológico escala 1:250 000 (INEGI, 1998), de los cuales dos presentan Vertisoles y Feozems (20 000 ha) y sólo uno Vertisoles (10 000 ha), lo cual se debe a la escala de los mapas (Chuvieco, 1990).

El muestreo en campo se realizó en cada centímetro cuadrado (48 puntos de muestreo en campo), de los cuales los más representativos se utilizaron para definir las parcelas de entrenamiento. En cada punto se colectó

una muestra de 2 kg de suelo, de 0 a 30 cm de profundidad. Para comprobar si el suelo correspondía a los Vertisoles, se barrenó a través de la profundidad y se colectaron datos del paisaje, para asociarlos con el tipo de suelo.

Con base en los límites de los suelos de las tres zonas seleccionadas, se excavó un perfil pedológico, el cual se describió de acuerdo con FAO (1990) y se colectaron muestras alteradas de suelos de cada una de las capas del perfil para su análisis en el laboratorio. Las determinaciones físicas (textura, densidad aparente (DA) y color), químicas [pH, materia orgánica (MO), CaCO_3 , conductividad eléctrica (CE), Ca, Mg, Na y K intercambiables y solubles, capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de saturación de bases (PSB), y porcentaje de sodio intercambiable (PSI)] y mineralógicas requeridas para clasificar a los suelos se realizaron con los procedimientos propuestos por Van Reeuwijk (1995). Las arenas se separaron de los limos y de las arcillas a través de un tamiz malla de 0.5 mm; la fracción de 250-500 μm se colocó en un portaobjetos con resina poliéster insaturada y se cubrió con un portaobjetos. Su identificación se realizó de acuerdo con Kerr (1965). Las arcillas (fracción $< 2 \mu\text{m}$) se determinaron a través del método de la pipeta (Van Reeuwijk, 1995) y luego se secaron en baño María para obtener polvo. Se dispersó con ultrasonido y posteriormente se colocaron unas gotas en portaobjeto para su depositación e identificación con un difractor de rayos X, Modelo MMAGBC. Los suelos se clasificaron según el Soil Survey Staff (2006) y la IUSS-ISRIC-FAO (2006).

Contenido de arcilla, densidad aparente, contenido de humedad, color, materia orgánica (considerados como los más representativos de los Vertisoles) se relacionaron con la reflectancia de las imágenes de satélite, mediante una regresión lineal simple. Los resultados se graficaron y se generaron modelos de regresión; después, se seleccionaron las variables que presentaron mayor ajuste para identificar y delimitar a los suelos. Además, se establecieron diferentes intervalos del porcentaje de arcilla (< 30 , 30-50, 50-70 y $> 70\%$) y densidad aparente (< 1.60 y $> 1.60 \text{ g cm}^{-3}$). Más de 30% de arcillas y más de 1.60 g cm^{-3} significa que es un Vertisol; cantidades menores de esos valores indican otro tipo de suelos (Soil Survey Staff, 2006; Porta *et al.*, 2003).

La imagen de satélite Landsat TM que se empleó para el modelado de los Vertisoles fue del 29 de abril de 2002, la cual fue de una fecha diferente de la fecha de

muestreo, por la disponibilidad de imágenes. Los sitios de entrenamiento se establecieron en los puntos de muestreo.

La clasificación supervisada se realizó mediante los siguientes métodos: paralelepípedo, el cual crea cajas usando los valores de reflectancia mínimos y máximos o unidades de desviación estándar dentro de los sitios de entrenamiento; mínima distancia, que calcula la distancia de los valores de reflectancia de un píxel, con la media espectral de cada valor de la firma y, entonces, asigna los píxeles a la categoría con la media más cercana; y máxima verisimilitud, que evalúa la probabilidad de que un píxel dado pertenezca a una categoría y clasifica el píxel en la categoría con la probabilidad más alta de los miembros (Eastman, 2001). Los tres métodos de clasificación se realizaron mediante el sistema de información geográfica Idrisi, donde las parcelas de entrenamiento para cada intervalo fueron de cinco por lo menos. Las coberturas de ciudades y cuerpos de agua se agregaron, con la finalidad de discriminarlos en la clasificación final y que no se confundieran con los diferentes intervalos de arcilla y densidad aparente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación y Mineralogía de los Suelos

El Cuadro 1 presenta las principales propiedades físicas y químicas de la capa uno de los tres perfiles realizados en la zona de estudio. Los dos primeros suelos tienen contenidos de arcilla mayores de 64%; además, éstos presentan grietas, lo que da pauta para clasificarlos como Vertisoles. En cuanto a la mineralogía, el Perfil 2 presenta 30% de cuarzo, 10% menos que los demás perfiles, lo que determina que este perfil sea más oscuro que los otros dos.

Los suelos identificados en la zona de estudio se clasificaron, a nivel de subgrupo, como: Chromic

Cuadro 1. Principales propiedades de la capa uno de los perfiles realizados en la zona de estudio.

Tipo de suelo	Arcilla	CO	CaCO_3	VV	Cuarzo	Feldespato
----- % -----						
Chromic Haplusterts	64	0.74	0.28	47.4	40.2	12.4
Typic Haplusterts	66	0.78	0.19	46.7	30.8	22.4
Mollic Ustifluvents	9	1.01	0.23	39.2	47.3	13.5

CO = carbón orgánico, CaCO_3 = carbonato de calcio, VV = vidrio volcánico.

Haplusterts o Vertisol eútrico (Perfil 1), Typic Haplusterts o Vertisol eútrico (Perfil 2) y Mollic Ustifluvents o Fluvisol mólico (Perfil 3) (Soil Survey Staff, 2006; IUSS-ISRIC-FAO, 2006). Cada uno de estos subgrupos presenta diferentes propiedades de absorción y reflexión de la luz relacionada con color, material de origen, mineralogía, ubicación en el paisaje y geomorfología (Escadafal *et al.*, 1989; Major *et al.*, 1992).

El Chromic Haplusterts corresponde a un Vertisol con coloraciones claras y brillantes (10YR6/1 en seco y 10YR4/1 en húmedo), por lo tanto, sus valores de reflectancia son altos (mayores de 37%, de acuerdo con la escala reportada por Lillesand y Kiefer, 1994). El material de origen es de rocas ígneas ácidas, de tipo riolítico. Su composición mineralógica en la fracción arena es de vidrio volcánico (47.4%), cuarzo (40.2%) y feldespato (12.4%). Con respecto a la fracción arcilla, ésta está compuesta de esmectita, cuarzo, ortoclasa, cristobalita y geothita, los cuales se intemperizaron y produjeron minerales secundarios silicatados como: vermiculitas e illita. Estos minerales son los responsables de dar los colores claros y brillantes al suelo.

Los Typic Haplusterts corresponden a suelos oscuros (10YR4/1 en seco y 10YR2/1 en húmedo) y se presentan en la parte central de la zona de estudio. El origen de los suelos también es de rocas riolíticas; su composición mineralógica en la fracción gruesa (arena) es de vidrio volcánico (46.7%), cuarzo (30.8%) y feldespatos (22.4%); la fracción arcilla está compuesta por esmectita, mica, caolinita, cuarzo, ortoclasa, geothita y cristobalita. Aunque este suelo presenta los mismos minerales que el anterior, tiene coloraciones más oscuras, por la acumulación de diferentes materiales y por el proceso de auto mezclado, ya que se encuentran en la parte más baja de la zona. Donde hay brechas, el contenido de arcilla es < 30%, el cual se incrementa en la zona de basaltos y alcanza hasta 70% en los planos de inundación, lo que significa formación *in situ* de las arcillas y su transporte y acumulación en las partes bajas.

Estos resultados concuerdan con Coulombe *et al.* (2000), quienes mencionan que los materiales ígneos que dan origen a los Vertisoles son principalmente rocas ígneas, y con Dixon y Weed (1989), quienes señalan que estos suelos se pueden formar por intemperismo *in situ* del material o por procesos aluviales donde las arcillas se transportan a los planos de inundación donde se depositan. De acuerdo con Porta *et al.* (2003), las arcillas esmectitas le dan el color oscuro al suelo que forman. Los colores oscuros de estos suelos permiten

que absorban más la luz y, por lo tanto, sus valores de reflectancia sean menores de 31%.

Los Mollic Ustifluvents son suelos jóvenes o poco desarrollados que se han formado en la parte más baja de la zona de estudio y están a lo largo del cauce del río Laja, por lo que tienen un origen aluvial (INEGI, 1996a; INEGI, 1996b). Son suelos con colores pardo oscuro rojizo (10YR3/2), en seco y en húmedo, de textura gruesa y formados por minerales de colores claros. Su composición mineralógica en la fracción arena es de cuarzo (47.3%), vidrio volcánico (39.2%) y feldespato (13.5%); con respecto a la fracción arcilla, su composición es de esmectitas, cuarzo y ortoclasa, lo cual significa que los sedimentos se originaron de roca riolítica. Dichos suelos alcanzan hasta 42% de reflectancia.

Estos resultados concuerdan con Ben-Dor *et al.* (1999), quienes mencionan que la cantidad de energía reflejada por la superficie está relacionada con la composición química de los minerales arcillosos o bien con los minerales primarios (como ortoclasa y cuarzo). Además, Escadafal *et al.* (1989) reportan que también es importante el tamaño de las partículas en la reflexión. Las arcillas dominantes presentes en los Vertisoles estudiados son esmectitas, lo cual concuerda con Dixon y Weed (1989), para este tipo de suelos. Además, Lindberg y Snyder (1972) mencionan que las esmectitas presentan un fuerte empaquetamiento y compactación y retienen altas cantidades de agua, y que las arcillas absorben más calor debido al agua que presentan en los microporos. Esto significa que a mayor humedad en los suelos, mayor absorción.

Todos los suelos estudiados tienen un patrón de reflexión y absorción de la luz, relacionado con las propiedades del suelo que se pueden jerarquizar de acuerdo con el nivel taxonómico. A nivel de Orden (Vertisol o Entisol) es el tamaño de partícula, es decir, suelos arcillosos o suelos arenosos; a nivel de Gran Grupo (Haplusterts), son el tipo de horizonte, las propiedades físicas y químicas, y el tipo de material parental; y a nivel de Subgrupo, el contenido de materia orgánica y mineralogía (Subgrupos Chromic o Mollic), propiedades relacionadas con el color del suelo (Soil Survey Staff, 2006).

Modelado de las Propiedades del Suelo

Los modelos generados para relacionar la reflectancia de la imagen con el porcentaje de arcilla de

los suelos de la imagen del 29 de abril de 2002 tienen correlaciones bajas. La mejor tendencia y concentración de los valores de reflectancia del contenido de arcilla se presentó en la región del infrarrojo (1.55-1.75 nm y 2.08-2.35 nm), que corresponden a las bandas 5 y 7, respectivamente (Figura 1): la reflectancia espectral se concentra en el intervalo 96-121 (banda 5), con un intervalo de 28 y 50% de precisión o puntos estudiados, o bien, entre 78 y 101, con intervalo de 23, con 52% de los puntos (banda 7). Los contenidos de arcilla entre 30 y 70% representan 70% de los puntos estudiados.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Hunt y Salisbury (1970), quienes concluyen que las propiedades del suelo se detectan en las bandas 5 y 7. Chuvieco (1990) establece que la reflectancia de la superficie terrestre se debe principalmente al calor que emite, por eso es que se detecta en el infrarrojo térmico, de la banda 7. Además, la cantidad de calor puede variar 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 tienen menor temperatura (Escadafal *et al.*, 1989).

En el caso de la densidad aparente, ésta se define como la masa por unidad de volumen y está directamente relacionada con la estructura del suelo. Sirve para conocer el manejo de los suelos, ya que da información sobre lo compacto de cada horizonte, y permite inferir las dificultades para que circulen el agua y el aire (Porta *et al.*, 2003). Por lo tanto, los suelos con valores de densidad aparente $> 1.6 \text{ g cm}^{-3}$, deben absorber más la luz, por el empaquetamiento denso de las partículas; es decir, los valores de reflectancia que en las imágenes de satélite tienden a ser más bajos, corresponden a Vertisoles; para el caso de los Entisoles, éstos presentan valores de densidad aparente menores de 1.6 g cm^{-3} (Figura 2).

La Figura 2 muestra que 50% de los sitios estudiados tienen valores de reflectancia de 96 a 122 (intervalo

de 26) en la banda 5; y de 53% cuando los suelos tienen una reflectancia entre 78 y 101 (intervalo de 23). Cabe aclarar que los valores de densidad aparente analizados corresponden de 1.6 a 1.9 g cm^{-3} , los cuales dominan en los sitios estudiados. De acuerdo con la literatura, estos valores corresponden a suelos arcillosos o a Vertisoles, por el empaquetamiento denso de las partículas finas (Brady y Weil, 1999). Además, Curran (1985) mencionó que los suelos con valores de densidad aparente altos presentan baja reflectancia, por el empaquetamiento de las partículas, la fuerte estructura, el alto contenido de humedad y la textura fina.

Análisis Espacial de las Imágenes de Satélite

Con base en los modelos de regresión, sólo se utilizó el porcentaje de arcilla para delimitar a los Vertisoles. Los resultados de la clasificación supervisada, para los diferentes porcentajes de arcilla en la imagen de 2002, muestran que los suelos de la zona presentan contenidos de arcilla de 30 hasta 76%, los cuales están relacionados con las geoformas y el material parental (INEGI, 1988; 1996a,c). La Figura 3 presenta la distribución de los suelos identificados y delimitados por el INEGI y la Figura 4 presenta los suelos identificados y delimitados con trabajo de campo.

Con respecto a los suelos delimitados con la modelación espacial del porcentaje de arcilla, el método de máxima verosimilitud de la clasificación supervisada del porcentaje de arcilla es el que presenta mejor delimitación (Figura 5). Los métodos del paralelepípedo y mínima distancia juntan los porcentajes de arcilla con las ciudades y cuerpos de agua.

Los contenidos de arcilla se identificaron en la región espectral de 1.55 a 1.75 nm, que corresponde a la banda 5 y de 2.08 a 2.35 nm, para la banda 7. La Figura 5 muestra los Vertisoles ($> 30\%$ de arcilla) y Entisoles ($< 30\%$ de arcilla). Los valores altos se asocian

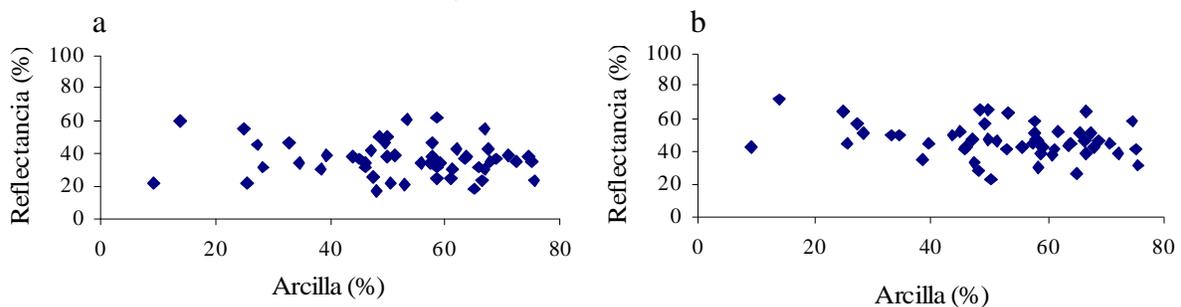


Figura 1. Reflectancia de los suelos según el porcentaje de arcilla de las bandas 5(a) y 7(b), imagen Landsat TM de 2002.

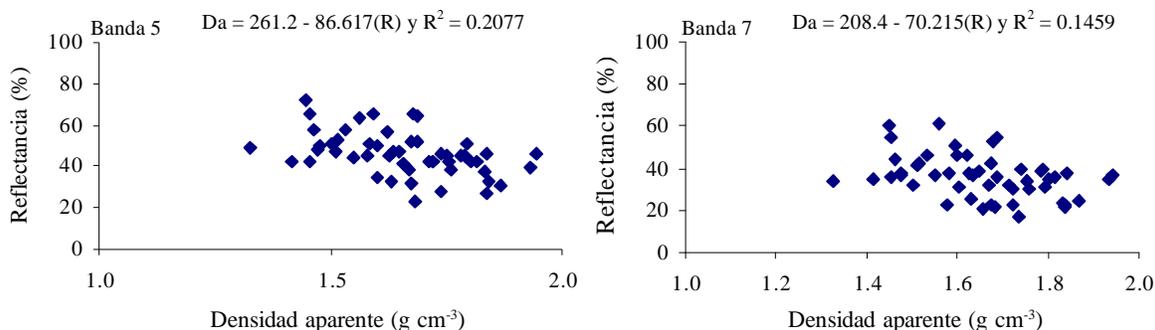


Figura 2. Reflectancia de los suelos, según la densidad aparente en las bandas 5 y 7, imagen Landsat TM de 2002.

con los Vertisoles, por la cantidad y el tipo de arcilla (Soil Survey Staff, 2006).

Con base en los porcentajes de arcilla, se encontró que los Vertisoles ocupan una superficie de 23 452 ha. Como se puede observar, los suelos delimitados por el INEGI (1996c) (Figura 3), con el trabajo de campo (Figura 4) y percepción remota (Figura 5), no coinciden; los suelos delimitados con percepción remota, los Entisoles o Fluvisoles se confunden con las zonas urbanas y carreteras; esto dificulta delimitarlos con percepción remota.

El porcentaje de arcilla y la densidad aparente no presentaron alta correlación con la reflectancia espectral de la imagen de satélite Landsat TM; la delimitación de Vertisoles por medio del método de máxima verisimilitud es diferente de la realizada en campo en esta investigación, porque los Entisoles o Fluvisoles resultan dentro de los Vertisoles.

Estos resultados son diferentes de los encontrados por Chen *et al.* (2004) quienes reportaron que

el contenido de arcilla se puede identificar y cartografiar a través de imágenes de satélite; dichos autores obtuvieron una correlación de 84% y delimitaron contenidos de arcilla < 3%, 3-6%, 6-9%, 9-12%, 12-15% y > 15%; estudio realizado en 115 ha, con 28 puntos de muestreo de campo. Estos intervalos de arcilla son cortos y no tienen ninguna utilidad de fertilización y clasificación. Sorensen y Dalsgaard (2005) demostraron que los contenidos de arcilla pueden identificarse en la región del infrarrojo cercano, a través de imagen de satélite; ellos identifican contenidos de arcilla de 2-26% y 26-74%, para suelos de Dinamarca. En cuanto a su delimitación cartográfica, Martínez y Monger (2002) encontraron que los diferentes Órdenes de suelos se pueden delimitar a través de imágenes de satélite con una precisión de 67%. Estos autores trabajaron en invernadero en condiciones controladas; sin embargo, en campo los patrones espectrales de Vertisoles y Entisoles son similares por lo que no se pueden delimitar cartográficamente.

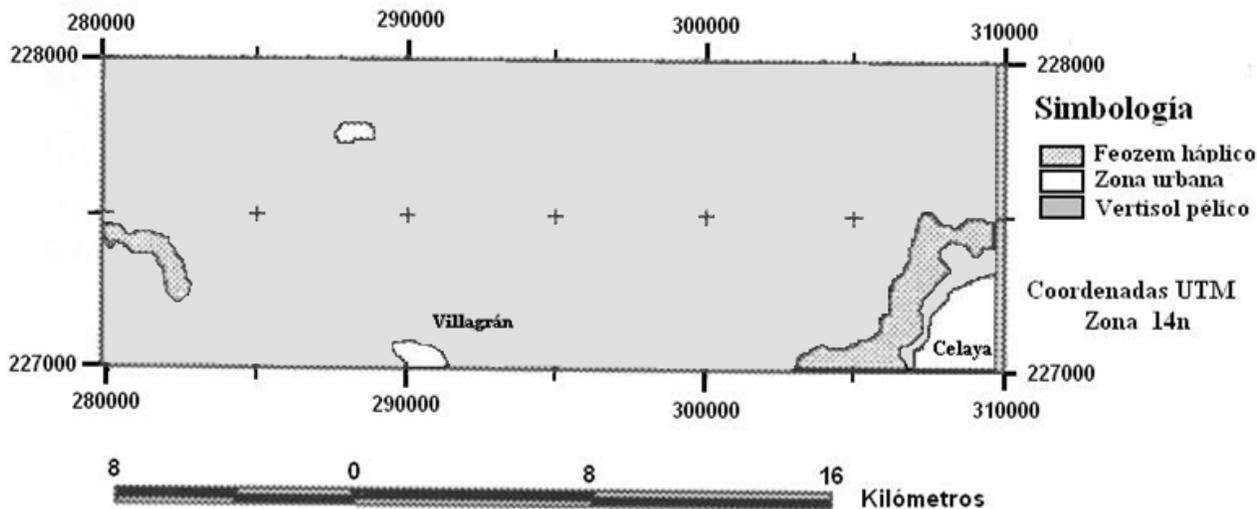


Figura 3. Suelos reportados por INEGI en la zona de estudio con la versión FAO (1970).

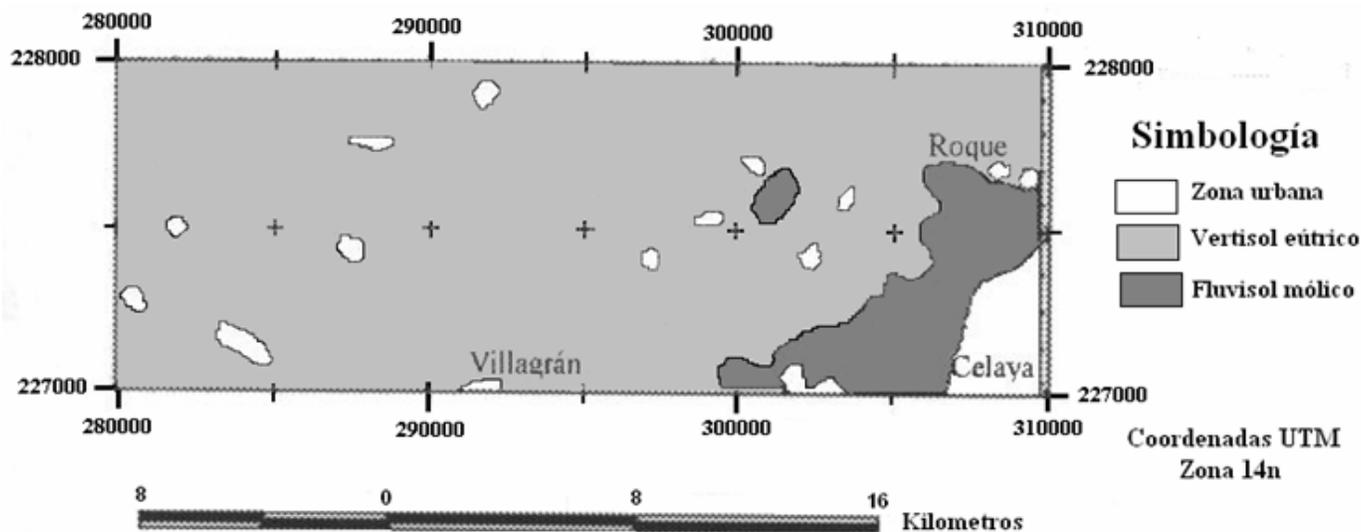


Figura 4. Suelos identificados con trabajo de campo y clasificados con base en la WRB (2006).

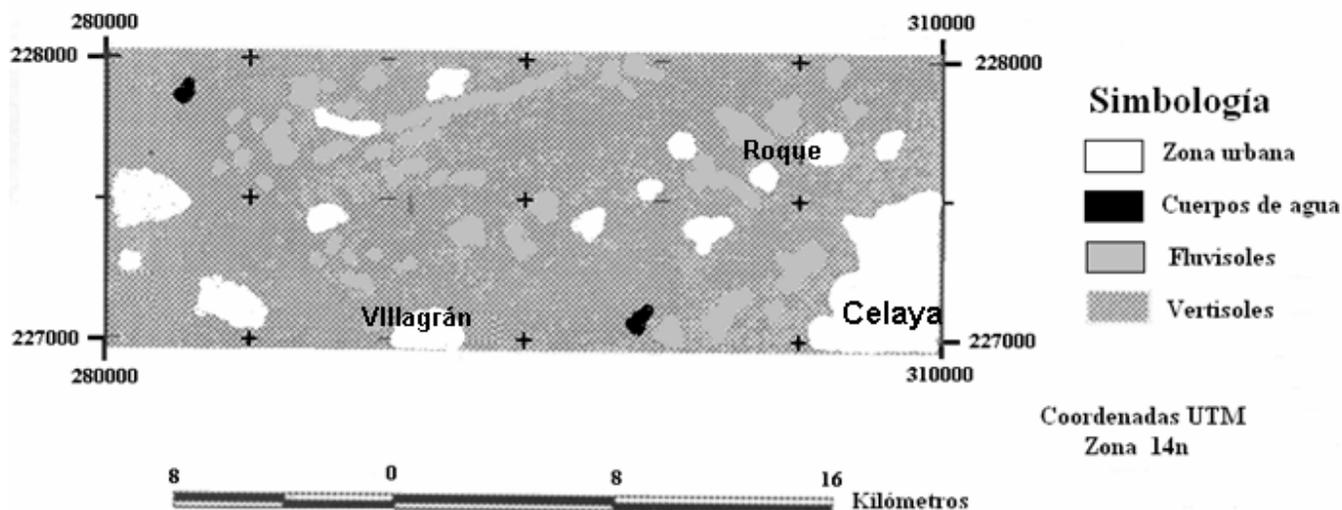


Figura 5. Distribución de Vertisoles resultantes de la clasificación supervisada con los porcentajes de arcilla con las bandas 5 y 7.

CONCLUSIONES

- Los suelos dominantes en la superficie de estudio son Vertisoles y se clasifican como Chromic Haplusterts y Typic Haplusterts; y los de menor distribución son los Entisoles y se clasifican como Mollic Ustifluvents. Los minerales que dominan en estos suelos son esmectitas, vermiculitas, cuarzo y feldspatos; por lo tanto, cada uno de estos subgrupos presenta propiedades de absorción y reflexión de la luz en forma diferente, la cual se relaciona con porcentaje de arcilla, densidad aparente y mineralogía de los suelos de la zona.
- La región espectral, donde el porcentaje de arcilla y la densidad aparente presentaron precisión > 50%, fue de

1.55-1.75 nm y de 2.08-2.35 nm, que corresponde a las bandas 5 y 7, respectivamente. Sin embargo, los Vertisoles presentan patrones espectrales similares a los Entisoles; por lo tanto, no se logró delimitarlos cartográficamente con el uso de imágenes de satélite.

LITERATURA CITADA

Baumgardner, M. F., L. F. Silva, L. L. Biehl, and E. R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44.
 Ben-Dor, E., J. R. Irons, and G. F. Epema. 1999. Soil reflectance. pp. 111-188. *In: A. N. Rencz (ed.). Remote sensing for the earth sciences; manual of remote sensing. Vol. 3. 3rd ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. New York, NY, USA.*

- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 12th ed. Prentice Hall. Philadelphia, NJ, USA.
- Chen, F., D. E. Kissel, L. T. West, W. Adkins, R. Clark, D. Rickman, and J. Luvall. 2004. Field scale mapping of surface soil clay concentration. *Precision Agric.* 5: 7-26.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección especial. Rialp. Madrid, España.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. E269-E286. *In*: M. E. Sumner (ed.). Handbook of soil science. New York, NY, USA.
- Curran, P. J. 1985. Principles of remote sensing. Longman. London, UK.
- Dixon, J. B. and S. B. Weed. 1989. Minerals in soil environments. 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Eastman, R. R. 2001. Idrisi. Versión 1.32.2. Manual del usuario. Clark Labs, The Idrisi Project. Clark University. New York, NY, USA.
- Escadafal, R., M. C. Girard, and D. Courault. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sens. Environ.* 27: 37-46.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 1990. Guideline for soil profile description. 3rd ed. Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division, FAO. Rome, Italy.
- Fox, G. A., G. J. Sabbagh, S. W. Searcy, and C. Yang. 2004. An automated soil line identification routine for remotely sensed images. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1326-1331.
- Hunt, G. R. and J. W. Salisbury. 1970. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: silicated minerals. *Modern Geol.* 1: 283-300.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1988. Atlas Nacional del Medio Físico. Carta geológica 1:250 000. INEGI. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995. Salamanca F14-C63. Carta geológica 1:50 000. INEGI. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1996a. Celaya F14-C64. Carta geológica 1:50 000. INEGI. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1996b. Cortazar F14-C74. Carta geológica 1:50 000. INEGI. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1996c. Celaya F14-C64. Carta edafológica 1:50 000. INEGI. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1998. Querétaro F14-10. Carta topográfica 1:250 000. INEGI. Aguascalientes, Ags., México.
- IUSS-ISRIC-FAO (International Union of Soil Science-International Society of Reference and Information Center-Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. World reference base for soil resources. 2nd ed. World Soil Resources Report 103. FAO. Rome, Italy.
- Kerr, P. F. 1965. Mineralogía óptica. McGraw Hill. New York, NY, USA.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 1994. Remote sensing and image interpretation. 3rd ed. John Wiley. New York, NY, USA.
- Lindberg, J. D. and D. G. Snyder. 1972. Diffuse reflectance spectral of several clay minerals. *Am. Mineral.* 57: 485-493.
- Major, D. J., H. H. Janzen, B. M. Olson, and S. M. McGinn. 1992. Reflectance characteristic of Southern Alberta soils. *Can. J. Soil Sci.* 72: 611-615.
- Martínez R., J. J. and H. C. Monger. 2002. Soil classification in arid lands with thematic mapper data. *Terra* 20: 89-100.
- Melesio-Nolasco, S. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. *In*: V. Sorani, L. Cajuste y E. Ojeda (eds.). Estudios de recursos naturales renovables. II Coloquio sobre Sensores Remotos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- 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.
- Ortiz S., C. A. y Ma. del C. Gutiérrez C. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y D. Roquero C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ra ed. Mundi-Prensa. México, D. F.
- Sawaya, K. E., L. G. Olmanson, N. J. Heinert, P. L. Brezonik, and M. E. Bauer. 2003. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sens. Environ.* 88: 144-156.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to soil taxonomy. 10th ed. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sorensen, L. K. and S. Dalsgaard. 2005. Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 159-167.
- Stoner, E. R. and M. F. Baumgardner. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1161-1165.
- Swain, P. H. and S. M. Davis. 1978. Remote sensing. The quantitative approach. Purdue University. West Lafayette, IN, USA.
- Van Reeuwijk, L. P. 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Paper 9. 4th ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.