



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Segura Castruita, Miguel A.; Ortiz Solorio, Carlos A.; Gutiérrez Castorena, Ma. del Carmen
LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE:
Clasificación Automática Supervisada de la Imagen
Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2, abril-junio, 2003, pp. 149-156
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315595001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: Clasificación Automática Supervisada de la Imagen Location of Residual Moisture Soils Using Satellite Images: Automatically Supervised Classification of the Image

Miguel A. Segura Castruita^{1‡}, Carlos A. Ortiz Solorio¹ y
Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena¹

RESUMEN

Los suelos de humedad residual (SHR) tienen texturas gruesas, alto rendimiento agrícola en condiciones de secano y retienen agua. Se les ubica en zonas volcánicas. Estos suelos muestran una coloración azul grisáceo en imágenes de satélite en falso color, por lo cual suponemos que tienen una firma espectral específica. El objetivo del presente estudio fue establecer los criterios para reconocer suelos de humedad residual con el uso de imágenes de satélite. Se seleccionaron áreas con SHR, en los estados de México y Puebla, y se ubicaron sobre imágenes de satélite. Estas áreas correspondieron a las zonas de análisis de reflectancia en diferentes bandas, las cuales se emplearon en una clasificación supervisada, cuyos resultados se probaron en campo. La metodología generada mostró una eficiencia de 70%, pero la desventaja es que la reflectancia de los SHR puede confundirse con la reflectancia de las ciudades.

Palabras clave: Pómez, Landsat.

SUMMARY

The residual moisture soils (RMS) have coarse texture, high yield in dryland farming and they retain water. They are located in volcanic zones. These soils show a grayish blue coloration in satellite images in false color; therefore, we suppose that they have a specific spectral signature. The objective of this study was to establish the criteria for the recognition of residual moisture soils using satellite images. Areas with RMS in the states of Mexico and Puebla were selected and located on satellite images. These areas

corresponded to the zones of reflectance analysis in different bands, which were employed in a supervised classification and whose results were proved in the field. The methodology showed an efficiency of 70%, but the disadvantage is that RMS reflectance can be confused with the reflectance of the cities.

Index words: Pumice, Landsat.

INTRODUCCIÓN

Los campesinos del valle Puebla-Tlaxcala y del valle de Chalco conocen los suelos de textura gruesa con la capacidad de almacenar agua como “suelos de humedad residual” (SHR). La capacidad para retener humedad de estos suelos es una característica de importancia agrícola y económica en áreas con agricultura de secano en la región, ya que el rendimiento de maíz en grano (4.0 t ha⁻¹) es superior al que se obtiene en otros suelos (Díaz *et al.*, 1999); además, se han utilizado en investigaciones para la generación de tecnología y genotipos de maíz en el Plan Puebla (CIMMYT, 1969, 1974). No obstante, al desconocer las razones por las cuales estos suelos retienen humedad, así como su distribución geográfica y la extensión que ocupan en la región, la transferencia de tecnología es limitada.

Para conocer el comportamiento de los suelos con diferentes usos y sistemas de manejo, es necesario determinar ¿cómo son? y ¿dónde están? La clasificación taxonómica es una herramienta útil para responder a la primera pregunta y la segunda pregunta ¿dónde están? puede contestarse a través de observaciones de campo y su relación con el paisaje (Ortiz y Gutiérrez, 1999). La percepción remota es una técnica útil para alcanzar este fin en grandes superficies (Merchant y Ripple, 1996), siendo la firma espectral la expresión de la reflectancia de energía con la cual un objeto puede diferenciarse en una imagen de satélite (Stoner y Baumgardner, 1981; Melesio-Nolasco, 1991).

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. [‡](cast@colpos.mx)

En México, la aplicación de la percepción remota se inició desde 1976 y, hasta la fecha, se ha utilizado en estudios geológicos, forestales, uso y erosión del suelo, calidad del agua, identificación de cultivos y estimación de rendimientos (Soria *et al.*, 1998); sin embargo, estudios relacionados con la detección de suelos con propiedades similares (humedad y textura) no se han estudiado exhaustivamente.

Los suelos de humedad residual, objeto de la presente investigación, se han formado a partir de sedimentos aluviales, ceniza volcánica y piedra pómez (CIMMYT, 1974; Werner, 1978); se localizan en las laderas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl y en algunas partes del valle Puebla-Tlaxcala y de Chalco; aparentemente se observan de color azul grisáceo en imágenes de satélite en falso color (Ortiz, 1999, comunicación personal).

Al considerar que la reflectancia del suelo, en general, es función de algunas propiedades, como: contenido de humedad, materia orgánica, textura y conductividad eléctrica (Swain y Davis, 1978; Baumgardner *et al.*, 1985), conduce a suponer que los SHR tienen una firma espectral específica que es necesario corroborar con datos de campo para determinar si se trata del mismo tipo de suelo. Por este motivo, el objetivo de la presente investigación fue determinar la localización de los suelos de humedad residual a través del uso de las nuevas tecnologías de cartografía, como es la interpretación automática de imágenes de satélite y, con ello, comprobar que estos suelos generan una reflectancia específica que permite su separación de otros objetos en una imagen, obteniendo así su distribución geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la parte sur-este del estado de México y oeste del estado de Puebla, con una altitud que fluctúa de 2240 a 2350 m (Figura 1).

La región tiene influencia volcánica, debido a que productos volcánicos del Cuaternario cubrieron amplios sectores de la Sierra Nevada; además, al pie de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl se encuentran lahares y depósitos de nubes ardientes (Van Erffa *et al.*, 1976), de manera que los sedimentos, ceniza volcánica y partículas pomáceas constituyen el material parental de los suelos de la región (Werner, 1978). La vegetación en la zona es

escasa, debido a que se trata de suelos dedicados a la agricultura, por lo que la poca vegetación natural está compuesta por pirúl (*Schinus mollis* L.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), pino (*Pinus* spp.), encino (*Quercus* spp.), capulín (*Prunus capuli*), tejocote (*Crategus* spp.) y especies arbustivas y menores de la familia Compositae, Cruciferae, Amarillidaceae, Opuntia y Cucurbitaceae (Flores, 1971). Los suelos del área de estudio, según INEGI (1982), constituyen dos unidades del sistema FAO: Fluvisoles en el estado de México y Regosoles en Puebla. Estos suelos tienen uso agrícola de riego y secano, y en ellos se cultivan maíz, frijol, calabaza, alfalfa y flor, además algunos frutales e intercalaciones; siendo el maíz de mayor importancia (Díaz *et al.*, 1999).

Trabajo de Campo

Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo (tres en Puebla y uno en el estado de México), constituidos por suelos de humedad residual (SHR) representativos, de acuerdo con CIMMYT (1969, 1974). Se comprobó su existencia a través de visitas de campo, donde se realizaron entrevistas a productores para conocer el nombre con el que los campesinos los identifican, el uso que les dan, el rendimiento que obtienen de los cultivos que establecen y el registro de diferencias y similitudes (pendiente, color, textura y pedregosidad del suelo) entre un área y otra. En cada lugar que se visitó, se obtuvieron sus coordenadas, mediante un Sistema de Geoposicionamiento Global, utilizando un GPS12 marca GARMIN Modelo 12XL (B-100449) con una precisión de ± 10 m; para posteriormente localizarlos sobre la imagen de satélite.

Análisis de la Imagen de Satélite

La localización de los suelos de humedad residual se obtuvo por medio del análisis de una imagen de satélite, a través de una clasificación supervisada que consistió de los siguientes pasos:

Obtención de la imagen de satélite. Se dispuso de una imagen del satélite Landsat 5-MSS, donada por EOSAT^{TM/SM} (Customer Services Department) a la Universidad de Arizona, incluida en la página web <http://aria.arizona.edu>. La imagen de satélite que se obtuvo es una escena de la Ciudad de México, orientada a mapa con corrección de sistema y proyección UTM (Universal Transversa Mercator). El 07 de marzo de 1989 se captó la escena; esta fecha se

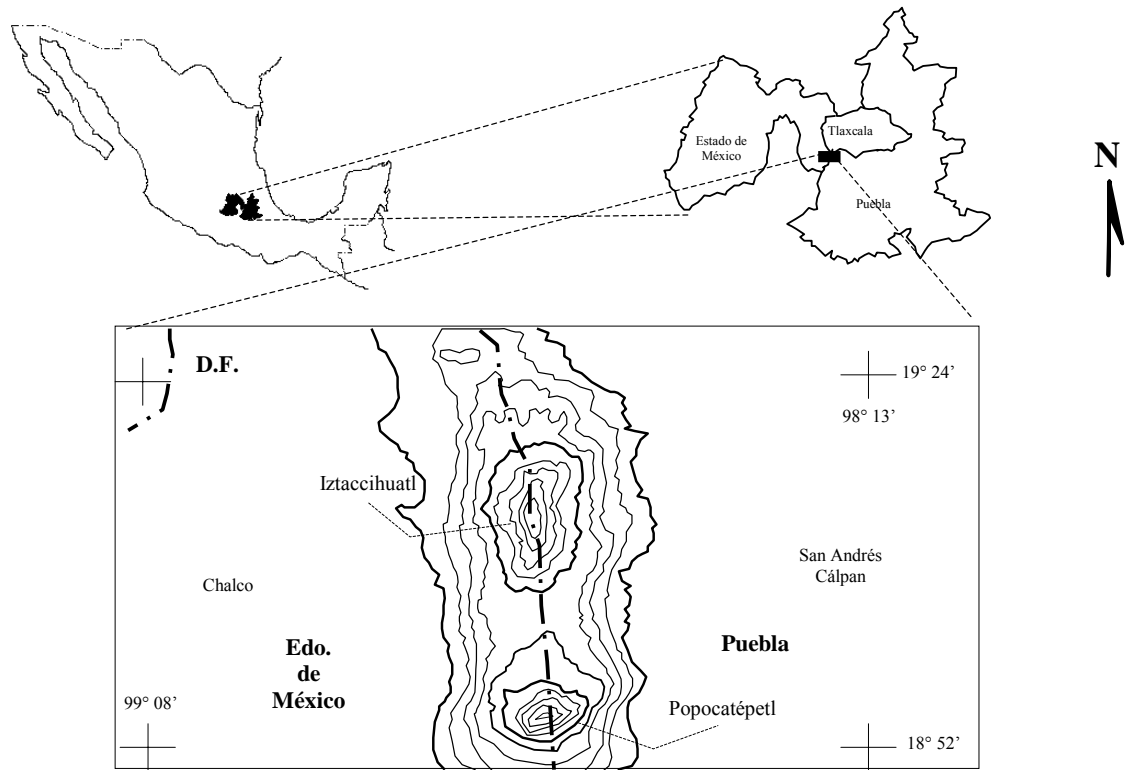


Figura 1. Localización del área de estudio.

eligió con el fin de eliminar la interferencia que pudiera causar la nubosidad. La escena tiene un tamaño real de 4059 columnas y 3833 renglones con un total de 1 626 508 píxeles. El tamaño del píxel es de 60 x 60 m y sus coordenadas UTM son: X mín. 364200 y X máx. 607680, Y mín. 1968480 y Y máx. 2194800.

Elaboración de la máscara digital. Obtenida la imagen, se procedió a delimitar el área de estudio, a través de la elaboración de una máscara digital en formato vectorial, considerando las coordenadas extremas del área de estudio, proceso que se realizó con el apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi®.

Delimitación de los sitios de entrenamiento. Los puntos de georeferencia que se obtuvieron en campo, de los lugares que ocupan los SHR, se ubicaron en un recorte de la imagen de satélite Landsat 5-MSS (área de estudio) y se formaron cuatro polígonos que constituyeron los sitios de entrenamiento y, posteriormente, se utilizaron en la clasificación de la imagen.

Procesamiento de la imagen. Se realizó una clasificación supervisada en forma automática de las bandas MSS 1, 2 y 5 (bandas 2, 3 y 6 del Landsat-TM) para obtener la localización de los SHR y los No SHR. El rango de emisividad que capta cada banda es el siguiente: MSS-1 de 0.5 a 0.6 μm , MSS-2 de 0.6 a 0.7 μm y MSS-5 de 10.4 a 12.6 μm . Estas bandas se utilizaron debido a que discriminan la humedad del suelo (Campbell, 1996).

La clasificación se llevó a cabo con el SIG Idrisi® y consistió de la asignación de una firma (nombre de identidad) a las parcelas, por medio de la herramienta Makesig y se identificó el área de estudio con el clasificador PIPED (método del Paralelepípedo). Éste se utilizó por ser el más simple y rápido en la obtención de resultados (Eastman, 1999).

Verificación de valores predichos. El mapa de localización de los SHR obtenido de la clasificación supervisada, se verificó a través de la selección al azar de 10 píxeles para cada categoría clasificada (SHR y No SHR) y se procedió a su comprobación en campo, mediante nuevas entrevistas a productores, dueños de

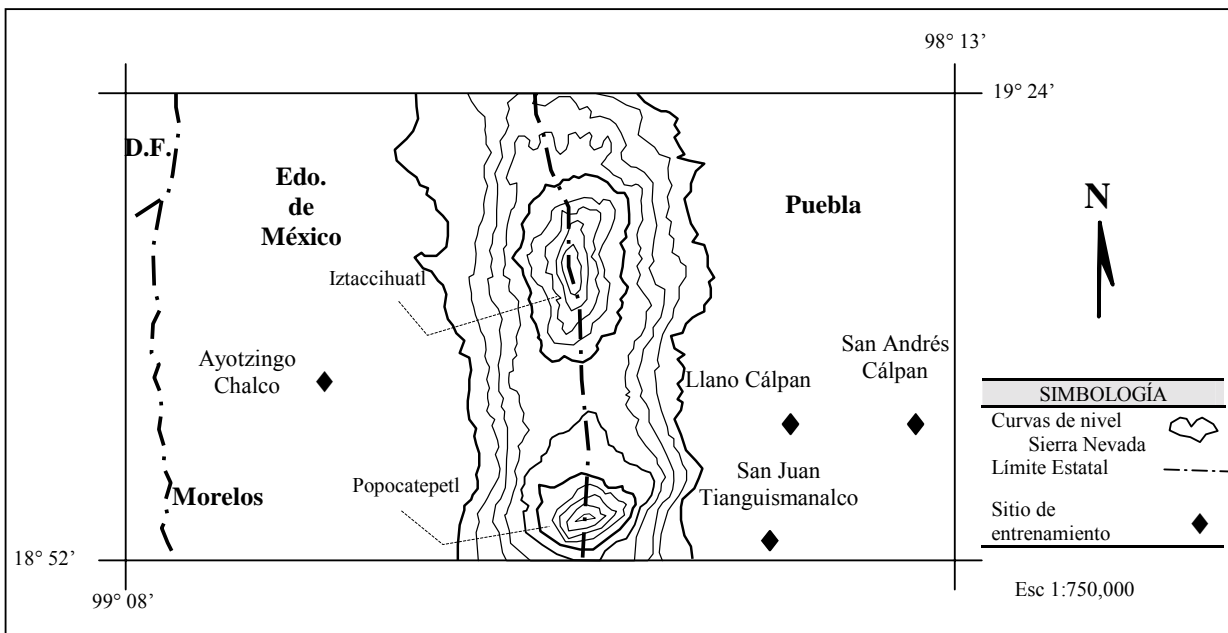


Figura 2. Ubicación de los sitios de entrenamiento.

las parcelas. Por último, se contrastaron los valores predichos en gabinete con los recabados en campo, para conocer cuántos fueron correctos y conocer la eficiencia del método.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y la discusión del presente estudio se muestran en tres apartados: a) Descripción de campo, b) Clasificación supervisada de la imagen de satélite en forma automática, y c) Comprobación de los resultados de la clasificación de la imagen de satélite. Los incisos a) y c) consistieron de recorridos de campo y entrevistas a productores, mientras que b) se efectuó en gabinete.

Descripción de Campo

Los suelos de humedad residual (SHR) tienen la peculiaridad de retener humedad, propiedad que los productores aprovechan para establecer diferentes cultivos, en un sistema de producción agrícola de secano.

Estos suelos tienen distintos nombres, dependiendo del lugar donde se localicen (Cuadro 1); sin embargo, el manejo que reciben es similar; en todos ellos se realiza un paso de arado y un rastreo o pisoneo inmediatamente después de la cosecha. La implementación de estas labores en el suelo se realiza

para romper la capilaridad del mismo y así conservar la humedad, como lo reporta Kronen (1994) en suelos de Sudáfrica.

Los campesinos, a través de su experiencia, relacionan la capacidad de retención de humedad únicamente con las labores que realizan después de la cosecha. Es probable que esta capacidad esté relacionada con algunas propiedades del suelo; sin embargo, no existe información acerca de éstas.

Clasificación Supervisada de la Imagen de Satélite en forma Automática

La ubicación de los sitios de entrenamiento (SE) se encuentra en la Figura 2, mientras que, en el Cuadro 2, se incluyen los rangos de los límites de clase (LC) y la media más-menos de la desviación estándar ($\bar{x} \pm \sigma$) de los valores de reflectancia (VR), del conjunto de SE para cada banda de la imagen de satélite. Los VR de los SHR son diferentes en cada una de las bandas; la Banda 5 presenta los mayores, mientras que en la Banda 2 y la Banda 1 son menores. Este comportamiento indica una variación en las características de la cobertura, dispersión atmosférica u otros factores (Peña, 1978; Swain y Davis, 1978).

A través de este método, y debido a la falta de datos de laboratorio de las características físicas y químicas de los SHR, no puede establecerse qué factor o factores están provocando la variación de

Cuadro 1. Resultados de las entrevistas realizadas en sitios con suelos de humedad residual.

SE [†]	Lugar	Coordenadas UTM	Nombre local del suelo	Cultivo	Rendimiento t ha ⁻¹	Observaciones
1	Llano Calpan, Puebla.	564971.1	Arenal	Maíz	3.7	Parcelas rastreadas y preparadas para la siembra. Pendiente < 3%. Color del suelo gris. Presencia de pómez. Textura arena.
		565210.0		Frijol	1.6	
		2113582.0		Alfalfa		
		2113343.0		Durazno		
2	San Andrés Calpán, Puebla.	562631.1	Arena	Maíz	4.0	Todo el lugar seco, ninguna lluvia en los últimos meses, el maíz amogotado y se cosechaba frijol. Pendiente < 10%. Color del suelo pardo grisáceo. Presencia de pómez. Textura arena.
		562871.1		Frijol	1.8	
		2114422.0		Durazno		
		2114182.0				
3	San Juan Tianguismanalco, Puebla.	559332.4	Xaltéte (Arena)	Flor	2.8	Algunas parcelas con paso de arado y rastreadas. Pendiente entre 5 y 10%. Gran cantidad de fragmentos de pómez. Color del suelo gris pardoso claro. Textura arena.
		559571.9		Maíz		
		2100566.0		Aguacatero		
		2100326.0				
4	Ayotzingo, Chalco estado de México.	509184.3	Arena, Húmeda	Maíz	3.5	La parcela contaba con paso de arado y rastreadas. Pendiente de 5%. Fragmentos de pómez redondeados y cantos rodados de basalto. Color gris pardoso claro. Textura arena.
		509424.2				
		2125879.0				
		2125639.0				

[†] SE = sitios de entrenamiento, UTM = Universal Transversal Mercator.

los VR. Al realizar una clasificación supervisada en forma automática, específicamente con el clasificador PIPED, se utilizan todos los VR de los píxeles que conforman a los SE (límite de clase) en cada banda (Eastman, 1999), sin considerar las características del suelo o del objeto de estudio por separado. La información que se obtuvo, después del procesamiento de la imagen, fue de carácter general, ya que todo el conocimiento *a priori* que se tenía sobre el suelo se generalizó, de manera que las diferencias entre una SE y otra no se puedan detectar, aun cuando se presenten variaciones en sus propiedades.

Al clasificar la imagen con los datos del Cuadro 2, se obtuvo la localización de los SHR (Figura 3a), los cuales se encuentran alrededor de la Sierra Nevada. La mayor agrupación de estos suelos se localiza en el valle Puebla-Tlaxcala y el valle de Chalco. Uno de los problemas que se tuvo en la localización de los SHR es su rango de VR, que se confunde con el que presentan las ciudades; es probable que esto se deba a

Cuadro 2. Rangos de valores de reflectancia de los suelos de humedad residual.

	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	LC	$\bar{x} \pm \sigma$	L.C.	$\bar{x} \pm \sigma$	L.C.	$\bar{x} \pm \sigma$
SHR [†]	26-37	31-34	36-49	41-47	90-114	93-102

[†] SHR = suelos de humedad residual; LC = límite de clases; \bar{x} = media; σ = desviación estándar.

la composición química de los materiales de estos suelos (pómez) y de la composición del concreto en las ciudades (cemento Pórtland), ambos con dominancia de SiO₂. El problema se resolvió con un archivo en formato vectorial de las ciudades; en este estudio, se utilizó la carta topográfica digitalizada del INEGI (1984), para no considerarlas como suelo (Figura 3b).

Comprobación de los Resultados de la Clasificación de la Imagen de Satélite

Para comprobar los resultados que se obtuvieron en el mapa de localización de los SHR, se seleccionaron al azar diez píxeles de cada categoría (SHR y No SHR) y se contrastaron con información de campo. La ubicación de los puntos que se eligieron aparece en la Figura 4.

Al realizar el recorrido de campo, para verificar la existencia o no de los SHR y No SHR, se llevaron a cabo entrevistas a productores de los lugares que se visitaron y se registraron observaciones de cada sitio (Cuadros 3).

Los sitios seleccionados dentro de la categoría de SHR presentan las características que se encontraron en los lugares que se tomaron como SE (excepto los Sitios 7, 8 y 9).

La diferencia entre los sitios que se visitaron es el uso del suelo, lo cual está determinado por la ubicación geográfica donde se encuentren; es decir,

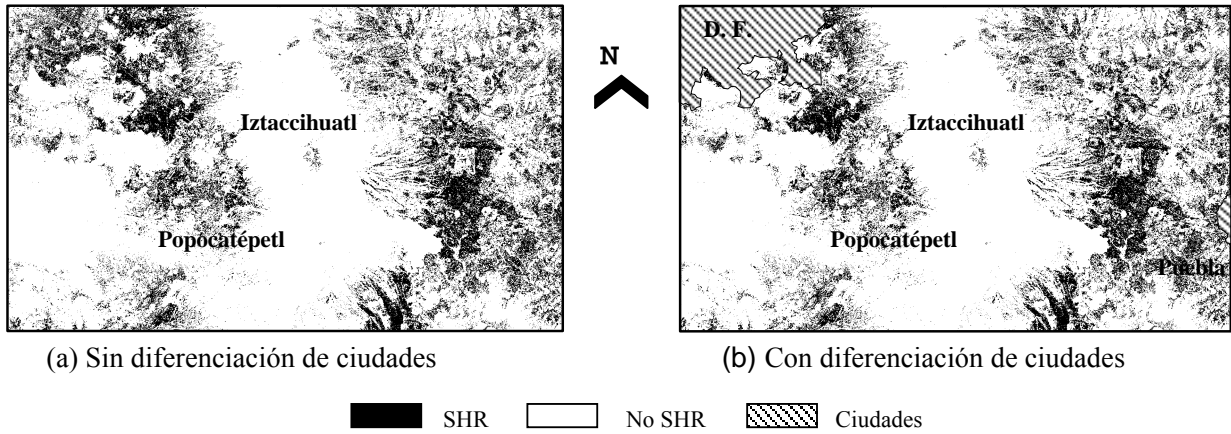


Figura 3. Localización de los suelos de humedad residual.

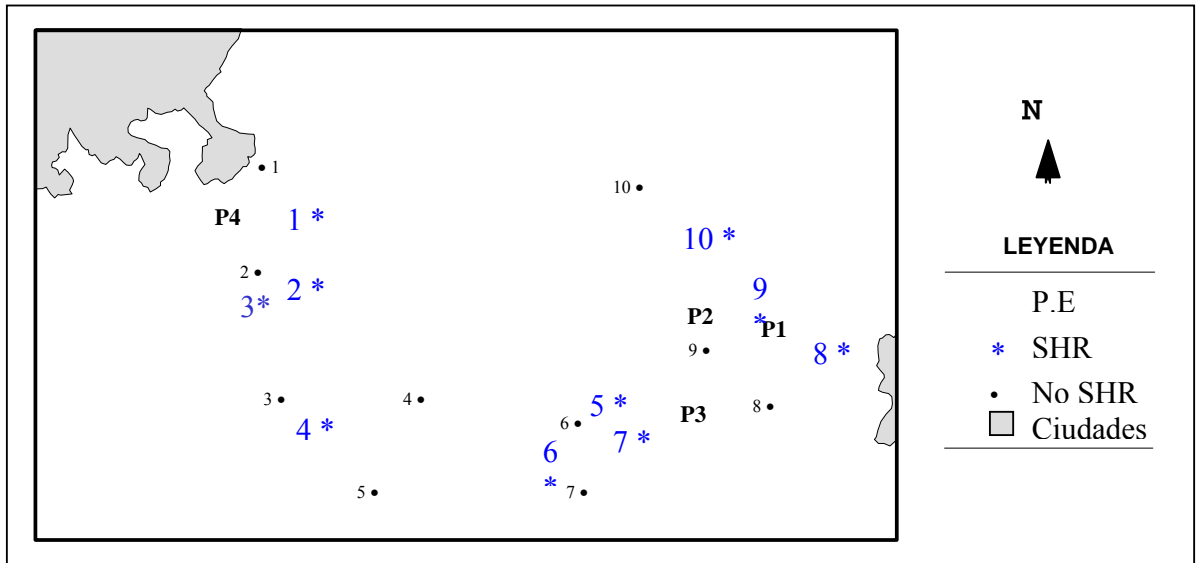


Figura 4. Ubicación de puntos de comprobación de sitios con SHR y No SHR.

mientras en los estado de México y Morelos se siembran únicamente maíz y frijol, en Puebla se siembra maíz, frijol, cultivos intercalados, flores y frutales.

Al cotejar la información extraída del mapa de localización de estos suelos para la categoría SHR, el mapa tuvo siete aciertos y tres errores (Cuadro 3). Los Sitios 7, 8 y 9, a pesar de presentar la característica de ser arenosos y retener humedad, se consideraron como errores, debido a que presentan un manejo diferente; los Sitios 7 y 8 tienen un sistema de producción agrícola con riego y el Sitio 9 no es agrícola, pues es

un suelo que se encuentra dentro de los terrenos de una constructora de concreto.

Para la categoría de No SHR, el mapa resultó con siete aciertos y tres errores (Cuadro 4). Los errores que se presentaron consistieron en sitios que en apariencia correspondían a SHR en el mapa, pero que al ser cotejados en campo no existían, lo que revela que el mapa sobreestima el área ocupada por estos suelos. Lo anterior puede explicarse por el proceso que desarrolló el clasificador (PIPED) al realizar la clasificación en forma automática, ya que los píxeles son asignados a una clase informacional dada, si el

Cuadro 3. Localización y observaciones de los puntos de verificación de los suelos de humedad residual.

S [†]	C	R	Coordenadas UTM [‡]		SHR [§]		Observaciones
			X	Y	Ac	E	
1	467	321	513709.0	2127812	◆		Siembra de frijol, rendimientos de 1.8 t ha ⁻¹ , aplican estiércol; en la superficie tepalcates y piedra pómez, pendiente < 3%
2	462	511	513387.5	2116424	◆		Siembran maíz, rendimiento 3.0 t ha ⁻¹ , aplican estiércol, en la superficie piedra pómez, pendiente > 8%
3	488	928	514960.1	2091396	◆		Superficie rastreada, lista para la siembra, grava de pómez en la superficie, pendiente > 5%
4	462	948	513434.9	2090079	◆		Suelo en descanso, pero siembran maíz, rendimientos de 2.8 t ha ⁻¹ , grava de pómez en la superficie
5	1041	986	548164.1	2087910	◆		Suelo sin laboreo, presencia de piedra pómez en la superficie, pendiente < 3%, aplican estiércol, siembran maíz y frijol.
6	1129	851	553447.4	2096050	◆		Suelo recién sembrado con maíz, rendimientos de 3.2 t ha ⁻¹ , aplican fertilizante, pendiente < 5%, presencia de piedra pómez en la superficie
7	1214	951	558527.2	2090050	◆		Suelo arenoso, con las mismas características que los anteriores, cultivan flor, sin embargo, es de riego
8	1500	751	575706.5	2102030	◆		Suelo arenoso, piedra pómez en la superficie, producen maíz y frutal pera, pero es de riego
9	1358	506	567185.3	2116716	◆		Suelo sin laboreo, dentro de terrenos que ocupan fabricas de armaduras para puentes de concreto
10	1269	347	561799.2	2126296	◆		Siembra de maíz, rendimiento de 3.0 t ha ⁻¹ , frutales de pera y durazno, aplican fertilizante, presencia de piedra pómez en el superficie, pendiente < 3%

[†] S = sitio, C= columna del píxel en la imagen de satélite, R = renglón del píxel en la imagen de satélite; [‡] UTM = Universal Transversa Mercator; [§] SHR = suelos de humedad residual, Ac = acierto, E = error.

Cuadro 4. Localización y observaciones de los puntos de verificación de No SHR.

S [†]	C	R	Coordenadas UTM [‡]		No SHR [§]		Observaciones
			X	Y	Ac	E	
1	412	246	510449.1	2132353	◆		Suelo con textura franca, arbustos y pasto
2	472	477	514008.9	2118492	◆		Afloramientos rocosos y vegetación arbustiva
3	426	795	511271.4	2099284	◆		Cobertura vegetal de pasto, poco suelo desnudo de textura franca
4	657	771	515153.8	2100728	◆		Cobertura vegetal de árboles y pasto
5	546	939	518453.1	2090620	◆		Suelo arenoso con inicios de urbanización sin capacidad de retener humedad
6	1274	505	562148.8	2116804	◆		Suelo desnudo de textura franca arcillosa
7	1095	843	551476.4	2096396	◆		Suelo desnudo de textura arcillosa
8	1362	726	567522.3	2103435	◆		Cobertura de arbustos y pasto, suelo desnudo de textura arcillosa
9	1238	657	572570.4	2107691	◆		Suelo desnudo de textura franca, cultivo de maíz y frutales, con riego
10	1079	813	559589.4	2129606	◆		Suelos de textura franco arcillosa, cultivo de maíz y frijol, con riego

[†] S = sitio, C = columna del píxel en la imagen de satélite, R = renglón del píxel en la imagen de satélite, [‡] UTM = Universal Transversa Mercator, [§] No SHR = no suelos de humedad residual, Ac = acierto, E = error.

valor de reflectancia en cada banda se ubica dentro de los valores máximos y mínimos registrados (límite de clase) o están dentro de un número específico de desviaciones estándar (Eastman, 1999).

De acuerdo con lo anterior, en el desarrollo de la clasificación en forma automática se consideraron indistintamente los límites de clase de los VR de todos los sitios de entrenamiento en cada banda, lo que

provocó que un mayor número de píxeles fuera clasificado y aparecieran en el mapa de localización de los SHR. Después de considerar los aciertos y los errores en las categorías SHR y No SHR, el mapa sólo alcanza 70% de confiabilidad.

Es factible que este resultado se mejore si se realiza una clasificación supervisada de la imagen con análisis píxel por píxel; diferentes estudios de suelos,

donde se utilizó esta metodología, han demostrado que se mejora la calidad (Lee *et al.*, 1988; Navone, 1998).

CONCLUSIONES

- Los suelos de humedad residual pueden diferenciarse en zonas volcánicas a través de la interpretación automática de imágenes de satélite, por la reflectancia que éstos producen.
- El mapa de localización de suelos de humedad residual, obtenido en forma automática con el clasificador PIPED del SIG Idrisi®, tiene 70% de confiabilidad.
- El conocimiento de la ubicación de las ciudades es importante para evitar que se confundan con los suelos de humedad residual durante el proceso de clasificación.

LITERATURA CITADA

- Baumgardner, M.F., L.F. Silva, L.L. Biehl y E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44
- Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. Second edition Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Press. New York.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1969. El Plan Puebla: 1967-1969. El Batán. Texcoco, México.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. El Plan Puebla: Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán. Texcoco, México.
- Díaz C., H., L. Jiménez S., R.J. Laird y A. Turrent F. 1999. El Plan Puebla 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. México.
- Eastman, J.R. 1999. Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing. Volume 1. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.
- Flores M., G. 1971. Tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Agrología. México, D.F.
- Frazier, B.F. y A.J. Bussaca. 1988. Soil patterns of the Palouse Region as seen by Landsat Thematic Mapper. *Agronomy Abstr.* 35: 256.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1982. Carta edafológica de México, Escala 1:1 000 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984. Carta topográfica de México, Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kronen, M. 1994. Water harvesting and conservation techniques for smallholder crop production systems. *Soil Tillage Res.* 32: 71-86.
- Lee, K.S., G. Lee y E. Tyler. 1988. Thematic mapper and digital elevation modelling of soil characteristics in hilly terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1104-1107.
- Melesio-Nolasco, S. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. Apuntes del curso Satélites y Agricultura: El ejemplo Spot. pp. 2-19. *In:* Sorani, V., L. Cajuste y E. Ojeda (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Merchant, J.M. y W.J. Ripple. 1996. Special issue: Geographic information systems. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62: 1234-1244.
- Navone, S.M. 1998. Identificación de la erosión mediante el análisis de imágenes de satélite. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 13: 253-263.
- Ortiz, S., C.A. y M.C. Gutiérrez C. 1999. Fundamentos de pedología. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Peña, R.F. 1978. Situación actual y perspectivas de la clasificación automatizada de suelos. pp. 223-250. *In:* Memoria del V Congreso Nacional de Fotogrametría, Fotointerpretación y Geodesia. México, D.F.
- Soria R., J., C.A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales, experiencias en México. 1a edición. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Stoner, E.R. y M.F. Baumgardner. 1981. Characteristic variations on reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1161-1165.
- Swain, P.H. y S.M. Davis. 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill. New York.
- Van Erffa, W., W. Hilger, K. Knoblich y R. Weyl. 1976. Geología de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus contornos. *Comunicaciones* 13: 99-105. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. México, D.F.
- Werner, G. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores (comentarios a un mapa de suelos). *Suplemento Comunicaciones.* Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.