

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS EROSIONADAS POR MEDIO DE IMÁGENES LANDSAT ETM+, EN TLAXCO Y TERRENATE, TLAXCALA, MÉXICO

Soil Erosion Identification with Landsat ETM+ Images, in Tlaxco and Terrenate, Tlaxcala, Mexico

Enrique Buendía-Rodríguez^{1†}, Fabián Islas-Gutiérrez¹ y Vidal Guerra-De la Cruz²

RESUMEN

El estado de Tlaxcala presenta más de 67% de su superficie con algún grado de erosión, sin contar con un mapa detallado de distribución, por lo que resulta de interés ubicar de manera rápida y precisa las zonas que presentan este problema. Los datos obtenidos mediante sensores remotos son una alternativa que provee de información confiable a bajo costo. El objetivo de este estudio fue identificar y cuantificar las áreas que presenten diferentes grados de erosión en los municipios de Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, con ayuda de imágenes de satélite Landsat ETM+, procesadas mediante el software Erdas® Imagine® 8.5. Se clasificaron tres grados de erosión que fueron: erosión severa (ES), media (EM) y leve (EL), clasificadas con 86.53% de precisión global y el estadístico Kappa fue de 78.15% (coeficiente Khat de 0.7815). Los resultados encontrados indican que el municipio de Tlaxco presenta un total de 3432 ha de áreas erosionadas; de esta superficie 82.14, 8.39 y 9.46% corresponden a erosión severa, media y leve, respectivamente. En tanto, el municipio de Terrenate tiene un total de 1864 ha de áreas erosionadas, correspondiendo 88.6, 6.08 y 5.30% de erosión severa, media y leve, respectivamente.

Palabras clave: mapeo, clasificación supervisada, sensores remotos.

SUMMARY

More than 67% of the State of Tlaxcala shows some level of soil erosion; however, no detailed map on the distribution of these areas is currently available, despite

the need and interest in locating problem areas quickly and precisely. Data obtained by remote sensing are an alternative that provides reliable and low-cost information for this purpose. The objective of this study was to identify and quantify areas showing different soil erosion levels in the municipalities of Tlaxco and Terrenate, located in Northern Tlaxcala, with the satellite images Landsat ETM+, processed by Erdas® Imagine® 8.5 software. Three soil erosion levels were classified: severe erosion (ES), medium erosion (EM) and low erosion (EL) with 86.53% overall accuracy. The Kappa statistic was 78.15% (Khat coefficient 0.7815). Results indicate that the municipality of Tlaxco has a total of 3432 ha of eroded land, with 82.14, 8.39, and 9.46% corresponding to severe, medium, and low erosion levels, respectively. Terrenate municipality has a total of 1864 ha of eroded land, with 88.6, 6.08, and 5.30% corresponding to severe, medium, and low erosion levels, respectively.

Index words: mapping, supervised classification, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

Los suelos del estado de Tlaxcala han sido objeto de varios estudios cartográficos que van desde escalas 1: 250 000 en términos de clasificación de unidades de suelos (Cruz, 1949; INEGI, 1981; Werner, 1986), hasta los muy generalizados por ser de carácter regional y utilizar escalas pequeñas de 1: 1 000 000 o menores (Aeppli y Schoenhals, 1973; Estrada y Ortiz, 1982; Werner, 1986). Lo anterior hace que los reportes de superficie estatal erosionada sean variables. Por ejemplo, Cruz (1949) reportó que casi 67% de la superficie estatal presentaba algún grado de erosión, mientras que Estrada y Ortiz (1982) indicaron que la erosión fuerte abarcaba casi 57% de la superficie estatal, la moderada 10.7% y la ligera 32.3%. Por otro lado, los mapas de INEGI (1981) y Werner (1986) proporcionan información sobre suelos muy erosionados (tepates) ubicándolos en unidades de suelos específicos (Cambisoles con

¹ INIFAP-Campo Experimental Valle de México. Apdo. Postal 307, 56101 Chapingo, Estado de México.

[†] Autor responsable (buendia.enrique@inifap.gob.mx)

² INIFAP-Campo Experimental Tlaxcala. km 2.5 Carr. Tlaxcala-Chiautempan, 90800 Sta. Ana Chiautempan, Tlax., México.

duripanes), aunque no proporcionan datos sobre superficies.

Al margen de la utilidad de los mapas generados en estos estudios para fines de clasificación, muy poca información detallada puede obtenerse de ellos para objetivos más específicos, como la identificación, cuantificación y priorización de acciones de restauración de áreas críticas como las severamente erosionadas.

También se han realizado estudios que consideran los procesos que intervienen en la formación de los suelos, aspectos geológicos (Hilger, 1973) y factores de riesgo de erosión en el estado (Zárate *et al.*, 1991) y, más específicamente, algunos referidos a propiedades físicas y químicas de los tepetates (Werner, 1992; Etchevers *et al.*, 1998). La utilidad de este tipo de estudios es evidente con relación a acciones concretas de manejo a nivel local. Sin embargo, la mayoría de ellos se han realizado en la porción poniente de la entidad. Para los municipios del norte del estado no existen estudios detallados sobre la erosión, a pesar de su gran importancia hidrológico-forestal regional.

A pesar de esta relativa suficiencia de información sobre los suelos del estado, los programas oficiales de restauración de áreas degradadas aún requieren de información más detallada y actualizada que les permita en forma práctica y con un alto grado de precisión definir, orientar acciones y asignar recursos para el control de la erosión y, en ciertos casos, revertir las tendencias negativas en la pérdida de suelos a niveles locales y municipales en el estado.

Debido a la gran dinámica de cambio del recurso, es importante desarrollar y/o probar metodologías que permitan ubicar, de manera rápida, precisa y a bajos costos, aquellas áreas que presenten diferentes grados de erosión. Una de las técnicas que cumple con estos requisitos es la percepción remota que, en general, se refiere a la recolección de información de la cubierta terrestre a distancia sin tener contacto directo con los objetos a estudiar.

Varios autores han probado la bondad de la percepción remota para ubicar y clasificar áreas erosionadas. Así por ejemplo, Chapell y Brown (1993) usaron fotografías aéreas pancromáticas para cuantificar tasas de erosión y formas de erosión en suelos graníticos.

Algunos autores han buscado formas mixtas de procesamiento de información como las realizadas por Terrazas y Ortiz (1992), quienes llevaron a cabo una clasificación automática de tipos de erosión del suelo de

la cuenca oriente del valle de México, usando ortofotografías digitalizadas y encontraron que el método de clasificación automática resultó impreciso para interpretar erosión en cárcavas, mientras que para el tipo de erosión laminar-canalillos su precisión se aproxima al método de fotointerpretación.

Kolejka y Petch (1991) identificaron erosión en suelos Chernozems, usando técnicas de sensores remotos, entre las que se incluyen análisis de falso color de las bandas 2, 3 y 4 (RGB) de imágenes Landsat con base en la forma y acentuación de contraste.

En México, la contribución de los sensores remotos al estudio de los recursos naturales se ha incrementado significativamente en los últimos años, gracias a la disminución en los costos del equipo utilizado, en especial hardware y software.

Entre los trabajos realizados recientemente sobresale el de Martínez-Ríos y Curtis (2002), quienes utilizaron imágenes Landsat TM (Thematic Mapper) para clasificar suelos en zonas áridas del desierto chihuahuense en el condado de Doña Ana, Nuevo México, EE. UU., comparando cuatro métodos para identificar unidades de suelo en la escena. Los resultados mostraron que el método simple, basado en la discriminación de la banda térmica, obtuvo una precisión de 70.67%, mostrando a las bandas TM 2, 4 y 7 (RGB) como las mejores para identificar las unidades de suelo. El método técnico, basado en el análisis de componentes principales, obtuvo una precisión de 66.86%, lo que sugiere que la reducción de datos es posible mediante esta técnica. El método escalar, basado en operaciones matemáticas entre bandas TM, logró una precisión de 61.43% y señaló a los cocientes banda 1/banda 5, banda 3/banda 4 y banda 5/banda 4 como los mejores. El método complejo, basado en índices espectrales, logró una precisión de 28.50%; se distinguieron los índices SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), SVI (Simple Vegetation Index) y albedo, como las mejores transformaciones para la identificación de los suelos.

Teniendo en consideración la problemática de la cuantificación y ubicación de las zonas erosionadas en el norte de Tlaxcala y las ventajas de la percepción remota, en este trabajo se planteó como objetivo el identificar, ubicar y cuantificar las áreas que presentan diferentes grados de erosión por medio de imágenes del satélite Landsat ETM+, en los municipios de Tlaxco y Terrenate, en el estado de Tlaxcala.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la parte norte del estado de Tlaxcala, específicamente en los municipios de Tlaxco y Terrenate, entre las coordenadas 19° 24' 55" y 19° 43' 00" N, y 97° 50' 00" y 98° 20' 30" O.

Debido a la ubicación geográfica de los municipios estudiados fue necesario utilizar cuatro imágenes de satélite del sensor Landsat ETM+: Path/Row 25/47, 25/46, 26/46 y 26/47. Estas escenas sólo se encontraban disponibles en las siguientes fechas de toma: diciembre de 1999, 30 de marzo del 2000, y las dos restantes corresponden a 21 de marzo del 2000, las cuales fueron proporcionadas por CONAFOR (Comisión Nacional Forestal); para este estudio se utilizaron las bandas del espectro visible y del infrarrojo que tienen una resolución espacial de 30 m (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7); las imágenes cubren una superficie de 185 x 185 km por escena, con una resolución temporal de 16 días (Lillesand y Kiefer, 1994). Dichas imágenes se procesaron mediante el software ERDAS® Imagine® 8.5.

Para la delimitación de los límites estatal y municipales se utilizó información topográfica vectorial de INEGI, escala 1:50 000 con cubrimiento de todo el estado de Tlaxcala, así como del programa de ordenamiento ecológico general del estado de Tlaxcala (OET-CGE, 2002).

Se realizó una corrección geométrica con la finalidad de dar validez cartográfica a los valores digitales de la imagen. Se utilizaron 50 GCP (Ground Control Points) distribuidos homogéneamente en el estado. Dichos GCP fueron obtenidos de las cartas topográficas de INEGI, escala 1:50 000. Se rectificaron las imágenes en el sistema de referencia denominado UTM (Universal Transverse Mercator) con Datum WGS84 (World Geodetic System 1984) para la zona 14 y el elipsoide WGS84, utilizando el polinomio de primer grado. Con estos indicadores se obtuvo un RMSe (Root Mean Square error) de 0.77, considerado aceptable según Jensen (1986).

Una vez realizada la rectificación geométrica, se formó el mosaico del área de estudio con las cuatro imágenes. Para ello, se recortaron conforme a los contornos de los municipios considerados, utilizando los límites proporcionados por el programa de ordenamiento ecológico general del estado de Tlaxcala (OET-CGE, 2002), quedando una subimagen de 811 x 598 píxeles para el municipio de Terrenate y una de 1771 x 961 píxeles para el municipio de Tlaxco.

Para hacer la clasificación se utilizaron las bandas 2, 4 y 7 (RGB), que son las que recomiendan Martínez-Ríos y Curtis (2002) para identificar las unidades suelo. A la banda 4 se le aplicó tratamiento *crisp*, que agudiza la iluminación en toda la escena sin distorsionar la varianza entre bandas. Éste se utilizó porque la banda se encontraba poco definida debido a factores atmosféricos. A la banda 7 se le aplicó el filtro *edge enhance*, observándose una disminución en las estadísticas de los niveles digitales, siendo esto producto del efecto del filtrado que logra semejar el nivel digital (ND) de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo así la variabilidad espacial de la escena (ERDAS, 1999).

Debido al conocimiento que se tiene de la zona, se decidió hacer una clasificación supervisada con el método de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood). Este método parte de que todos los píxeles no tienen la misma probabilidad de ser incluidas en una clase; por lo tanto, se puede especificar un factor de ponderación para que los píxeles puedan pertenecer a determinada clase en particular (ERDAS, 1999). Tal clasificador es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculos; sin embargo, es el más empleado en la clasificación supervisada de imágenes, debido a su robustez y por ajustarse con más rigor a las disposiciones originales de los datos (Chuvienco, 1990).

Dado que el propósito de la clasificación fue identificar áreas erosionadas, se formaron cuatro clases. La primera correspondió a las áreas sin erosión y las tres restantes a erosión leve, media y severa. Los criterios para la caracterización de los diferentes grados de erosión fueron:

Áreas sin erosión (NE): Esta categoría incluye áreas agrícolas con pendientes menores de 5%, o bien, con vegetación forestal suficientemente densa como para evitar algún grado de erosión (Figura 1a).

Erosión leve (EL): áreas con cobertura vegetal arbustiva, herbácea y a veces arbórea en donde se aprecia muy poca pérdida de suelo por el efecto del agua y el aire, en consecuencia el suelo mineral no está expuesto. Aunque en ocasiones el suelo mineral está expuesto éste se mantiene en su sitio por el efecto de la vegetación. La Figura 1b muestra un paisaje representativo de esta condición.

Erosión media (EM): áreas con escasa cobertura vegetal, pastizales, matorrales o bosque muy abiertos. El suelo mineral es somero y está expuesto. En partes el material parental (rocas o tepetate) está parcialmente expuesto. No se observan cárcavas aunque sí erosión en canalillos.

La Figura 1c muestra un paisaje característico de este tipo de erosión.

Erosión severa (ES): áreas donde el material parental está totalmente expuesto y es evidente la presencia de erosión en cárcavas de 1 m o más de ancho. Estas áreas están totalmente desprovistas de vegetación, excepto en relictos que son las únicas partes donde se observa el suelo original. La Figura 1d muestra una zona con erosión severa en la que sobresalen las cárcavas.

Si bien existen otras clasificaciones sobre los tipos de erosión, como la reportada por Morgan (1979), se consideró que las cuatro clases definidas representan mejor la erosión de la zona de estudio.

La obtención de los campos de entrenamiento se obtuvo digitalizando pequeñas áreas sobre la escena, identificando regiones representativas de los grados de erosión. Esta fase es importante ya que varios autores han comprobado que los resultados de la clasificación, están mucho más influidos por la definición previa de las categorías, que por el criterio con el que éstas son posteriormente discriminadas (Chuvienco, 1990).

Se utilizaron un total de 83 campos de entrenamiento, de los cuales 22 fueron para detectar los diferentes grados de erosión y el resto para detectar las zonas sin erosión,

las cuales incluían agricultura, poblaciones, vegetación, cuerpos de agua, etc.

Para evaluar la clasificación se levantaron 52 sitios de verificación en el área de estudio. Se utilizó el *muestreo aleatorio estratificado* que se emplea en zonas extensas heterogéneas. Este método consiste en subdividir la zona en compartimentos homogéneos conforme a los criterios de grados de erosión detectados. En este caso se utilizaron las unidades que resultaron de la clasificación de la imagen y una categoría adicional que fueron zonas no erosionadas. Dentro de estas unidades homogéneas se ubicaron los sitios de verificación en forma aleatoria, cubriendo una superficie aproximada del 10% con respecto al total de zonas erosionadas.

La ubicación de los sitios de muestreo fue determinada usando un sistema de posicionamiento global (GPS). En cada sitio se tomaron los siguientes datos: ubicación geográfica (latitud y longitud), condiciones del terreno (grado de erosión sobre la base de los criterios definidos) y descripción del entorno del sitio de verificación. Con la información de los puntos verificados en campo y la proporcionada por la imagen se realizó una matriz de confusión para determinar la concordancia de la clasificación con la realidad observada en campo. De esta matriz se calculó



Figura 1. Paisajes representativos de las clases de erosión consideradas en el estudio.

la precisión global (F_m) que consiste en la relación de los elementos de la diagonal ($\sum x_{ii}$) con el total de los puntos muestreados ($\sum \sum x_{ij}$). La ecuación utilizada para calcular la precisión global es:

$$F_m = \frac{\sum x_{ii}}{\sum \sum x_{ij}} \quad (1)$$

Posteriormente, se calcularon los errores de omisión y de comisión. Los errores de omisión (E_{oi}) se refieren al número de sitios que perteneciendo a una determinada categoría no fueron incluidos en ella. Se calculan para cada clase como:

$$E_{oi} = \frac{(X_{i+}) - (X_{ii})}{(X_{i+})} \quad (2)$$

donde: X_{i+} indica el marginal de la fila i , y X_{ii} la diagonal de dicha fila.

De igual forma, las celdas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión (E_{ci}), esto es, sitios que se clasificaron en una determinada categoría perteneciendo a otra:

$$E_{ci} = \frac{(X_{+i}) - (X_{ii})}{(X_{+i})} \quad (3)$$

donde: X_{+i} indica el marginal de la columna i , y X_{ii} la diagonal de dicha columna.

Los errores de omisión se refieren a una definición imperfecta de la categoría, mientras que los errores de comisión a una delimitación excesivamente amplia (Chuvienco, 1990). También se calcularon la exactitud del usuario (F_{ui}), definida como la relación inversa a los errores de omisión (Ecuación 4) y la exactitud del productor (F_{pi}) que es la relación inversa a los errores de comisión (Ecuación 5).

$$F_{ui} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} * 100 \quad (4)$$

y

$$F_{pi} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} * 100 \quad (5)$$

para cada i de la categoría.

En los últimos años se ha introducción técnicas de análisis categórico multivariante, idóneas para el estudio global de matrices de confusión (Congalton *et al.*, 1983). Uno de los índices más empleados es el estadístico Kappa (k) o "KHAT", que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar (Ecuación 6). En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, presidiendo el causado por factores aleatorios.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+i})} \quad (6)$$

donde: n es el número de renglones de la matriz, X_{ii} es el número de observaciones en el renglón i y la columna i ($X_{i+} X_{+i}$) es el total de observaciones del renglón i y columna i , respectivamente, y N total de observaciones en la matriz de confusión.

Finalmente, debe indicarse que en este estudio no se realizó una clasificación morfopedológica de los tepetates, ni se analizaron los factores que determinan la erosión de los suelos, sino que sólo se clasificaron como áreas erosionadas en general, siguiendo los criterios mencionados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Superficies Municipales Erosionadas

Una vez validada la clasificación se procedió al cálculo de las superficies correspondientes a cada clase de erosión a nivel municipal, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 1.

En conjunto, los dos municipios incluyen más de 5000 ha de suelos erosionados, que en relación con las superficies municipales totales es relativamente poco (menos de 10%); sin embargo, es importante notar que la mayor parte de esos suelos erosionados (aproximadamente 85%) se clasifican como erosión severa; es decir, que de acuerdo con los criterios establecidos para este estudio son prácticamente áreas cubiertas de tepetates.

Las superficies municipales clasificadas en este estudio como erosión severa muestran una diferencia considerablemente menor de 2800 ha, con respecto a las superficies, de Cambisoles con duripanes que se estimaron del estudio de Werner (1986). Esta diferencia se debe a que en este estudio las áreas agrícolas se excluyeron sistemáticamente como áreas no erosionadas, mientras que Werner (1986) las incluyó en su clasificación como suelos formados por Cambisoles con horizontes de duripan, reflejando así una mayor superficie con erosión severa. Las áreas agrícolas con este tipo de suelos en los dos municipios bajo estudio son normalmente áreas roturadas que se han incorporado a la producción con cultivos anuales y cuya dinámica de erosión puede ser sustancialmente diferente a las áreas forestales o de aptitud forestal.

En cuanto a áreas con erosión media y ligera es evidente que Tlaxco también tiene mayor superficie en estas dos clases que Terrenate, aunque en términos relativos los dos presentan poca superficie con estos niveles de erosión. Sin embargo, tomando en cuenta la topografía accidentada que predomina en estos municipios, se debe poner especial atención a estas áreas, dado que en general se encuentran cerca de áreas forestales, algunos de los cuales están bajo aprovechamiento comercial.

Clases y Distribución de Áreas Erosionadas

En la Figura 2 se muestra la imagen clasificada que se obtuvo para el municipio de Tlaxco donde se confirma que la erosión severa es predominante, mientras que la erosión media y ligera se observan en menor proporción. Aunque las áreas de erosión se observan muy dispersas en el municipio, es importante notar que se ubican cerca de los cauces de arroyos que cubren casi todo el territorio municipal. Esta distribución geográfica de las áreas erosionadas en Tlaxco coincide en gran medida con la distribución observada en el mapa de Werner (1986).

Por otro lado, es notable que la erosión severa se encuentra ubicada principalmente en las partes bajas de los cerros, mientras que las áreas con erosión media y leve se ubican mayormente en las partes medias de las laderas. Este patrón de distribución de la erosión parece congruente con los patrones de cambio de uso del suelo, donde la mayor presión inicial se ejerce en las partes más accesibles; es decir, en las partes bajas de las laderas y cercanas a los núcleos urbanos, avanzando gradualmente hacia las partes media y altas de las laderas; y alejadas de las poblaciones.

En el caso del municipio de Terrenate, las zonas erosionadas siguen un patrón similar al de Tlaxco, es decir, presenta más áreas con erosión severa que se ubican principalmente en las faldas de los cerros; sin embargo, estas áreas se observan más compactadas que en Tlaxco, en especial en la parte noroeste y suroeste de la cabecera municipal (Figura 3).

Cabe destacar que en el caso de este municipio la distribución geográfica de las áreas erosionadas difiere considerablemente con la observada en el estudio de Werner (1986), lo cual sugiere que la superficie encontrada con erosión severa en Terrenate puede ser producto de un proceso más reciente (menos de 20 años).

Las áreas con erosión media y ligera son igualmente escasas en este municipio, aunque esto no limita su importancia dado que en Terrenate también existe una considerable superficie forestal arbolada que, si bien en su mayoría no está sujeta a aprovechamientos persistentes, revisten mucha importancia hidrológica regional. Esto es evidente ya que las áreas erosionadas se encuentran no sólo en las partes planas sino también en las laderas, afectando igualmente a casi todos los cauces que existen en este municipio.

Evaluación de la Clasificación

Para la evaluación de la clasificación se construyó la matriz de confusión (Cuadro 2), encontrándose

Cuadro 1. Superficies por tipo de erosión.

	Superficie erosionada			
	Terrenate	% Municipal	Tlaxco	% Municipal
	ha		ha	
Erosión severa (ES)	1651.88	7.73	2819.44	5.06
Erosión media (EM)	113.43	0.53	288.18	0.51
Erosión leve (EL)	98.87	0.46	324.75	0.58
Total de erosión	1864.19	8.72	3432.37	6.16

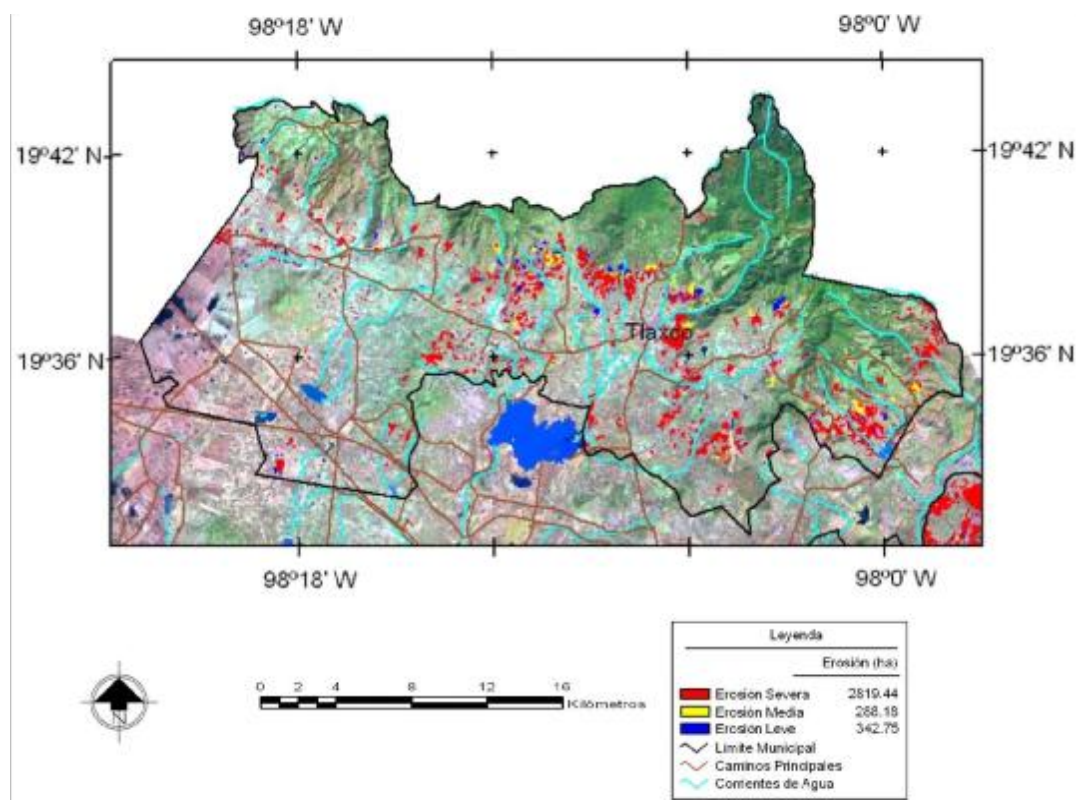


Figura 2. Imagen clasificada del municipio de Tlaxco.

una precisión global (F_m) de 86.53%, la cual se calculó con la Ecuación 1. Este resultado indica un alto grado de acercamiento a la realidad; es decir, la clasificación supervisada de las imágenes fue adecuada.

De la matriz de confusión se calcularon los errores de omisión y de comisión según las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente. Como se puede observar en el Cuadro 3, la mayor cantidad de errores de omisión se obtuvieron en la clase EM, seguido por la NE. Lo anterior implica que se puede estar sobrestimando la superficie asignada a estas categorías, dado que algunas zonas identificadas como erosión severa y no erosión se clasificaron como erosión media. El mayor error de comisión se obtuvo en la clase ES. En este caso, se subestimó la superficie, ya que sitios clasificados como NE y EM son en realidad ES.

Así también, se calcularon la exactitud del producto y del usuario (Cuadro 4) mediante las Ecuaciones 4 y 5, respectivamente, encontrando que las clases que tuvieron mayor precisión del productor fueron ES y EL, en tanto que la mayor precisión del usuario fueron las clases EM y EL.

Asimismo, al calcular el estadístico k mediante la Ecuación 6, obteniendo como resultado 0.7815, este valor

implica que el proceso de clasificación fue de 78.15% mejor que las esperadas al azar.

Note que el valor de k o KHAT (78.15%), es menor que la precisión global (86.53%) calculado previamente. La diferencia entre estas dos mediciones se debe principalmente a la diferencia de procesamiento de la información de la matriz de confusión. La precisión global sólo incluye los datos de la diagonal principal y excluye los errores de omisión y comisión, mientras que el estadístico KHAT incorpora los elementos que no

Cuadro 2. Matriz de confusión.

		Imagen clasificada [†]				Sitio en la imagen
		NE	EL	EM	ES	
Verificación de campo	NE	24			2	26
	EL					1
	EM	3			2	10
	ES		1	5	15	15
Sitios verificados		27	1	5	19	52
	Total					86.53%

[†] NE = no erosión, EL = erosión leve, EM = erosión media, ES = erosión severa.

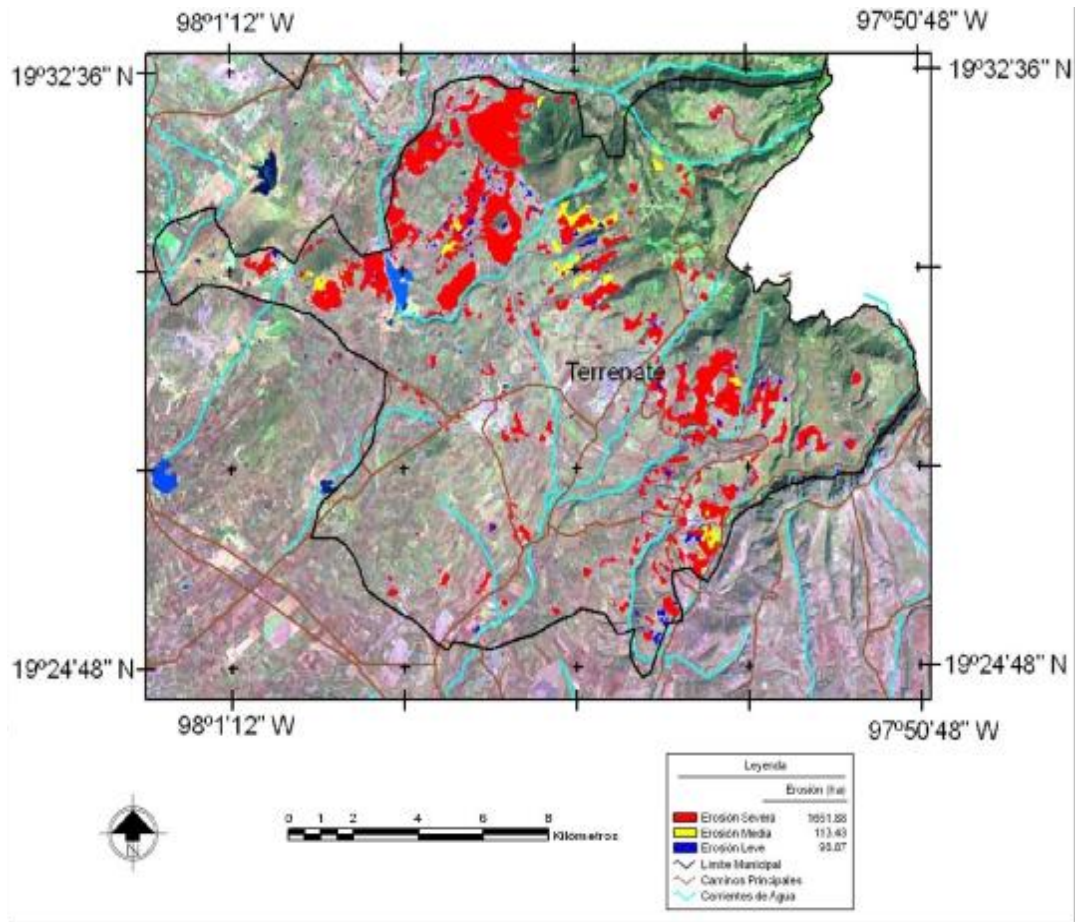


Figura 3. Imagen clasificada del municipio de Terrenate.

pertenecen a la diagonal principal, sino a los renglones y las columnas marginales.

CONCLUSIONES

En general, más de 80% de la superficie erosionada de los dos municipios corresponde a áreas con erosión severa, es decir áreas tepetatosas, mientras que las áreas con erosión media y leve constituyen alrededor de 8% cada una.

A nivel municipal y en términos absolutos, Tlaxco presenta 3432.37 ha de superficie erosionada y Terrenate

tiene una superficie erosionada de 1864.19 ha, aunque en relación con la superficie municipal, Tlaxco debido a su mayor extensión territorial (55 720.90 ha), sólo tiene 6.16% de superficie erosionada mientras que Terrenate (21 378.32 ha), tiene 8.72% de erosión.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la matriz de confusión, puede decirse que la metodología empleada en este estudio es suficientemente adecuada para la identificación y clasificación de áreas erosionadas con los criterios establecidos, obteniendo 86.53% de precisión

Cuadro 3. Errores de omisión y comisión.

Clase	Errores por clase (%)	
	Omisión	Comisión
No erosión (NE)	7.69	11.11
Erosión severa (ES)	0	21.05
Erosión media (EM)	50	0
Erosión leve (EL)	0	0

Cuadro 4. Comparación de precisión por clase.

Clases	Precisión por clase	
	Producto	Usuario
----- % -----		
No erosión (NE)	92.31	88.89
Erosión severa (ES)	100	78.95
Erosión media (EM)	50	100
Erosión leve (EL)	100	100

global y un estadístico Kappa de 78.15% (coeficiente Khat de 0.7815).

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional Forestal-Gerencia de Investigación y Desarrollo Tecnológico por el financiamiento para la realización de este estudio. Asimismo, se agradecen los apoyos logísticos otorgados por la Gerencia de la Región XIII de la CONAFOR para desarrollar el proyecto.

LITERATURA CITADA

- Aeppli, H. y E. Schoenhals. 1973. Los suelos de la cuenca Puebla-Tlaxcala. Comunicaciones 7: 15-18. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, Pue., México.
- Chapell, G. and A. M. Brown. 1993. The use of remote sensing in quantifying rates of soil erosion. *Koedoe* 36: 1-14.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Madrid, España.
- Congalton, R. G., R. G. Oderwald, and R. A. Mead. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 49: 1671-1678.
- Cruz L., C. 1949. Estudio agrológico regional del estado de Tlaxcala. Ingeniería Hidráulica en México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D. F.
- ERDAS. 1999. ERDAS Image field guide. 5th ed. ERDAS. Atlanta, GA, USA.
- Estrada B., W. y C. Ortiz. 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México, su presentación, escala 1: 8 000 000 obtenido de la metodología FAO. *Geografía Agrícola* 3: 23-27.
- Etchevers B., J. D., A. Pérez O., H. Brito V., M. Vargas I. y U. López N. 1998. La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala. pp. 17-36. *In*: H. Navarro G., H. Poupon y M. A. Pérez O. (eds.). Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP. Montecillo, Estado de México.
- Hilger, W. 1973. Observaciones respecto a la geología de la región de Puebla-Tlaxcala. Comunicaciones 7: 3-6. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, Pue., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1981. Síntesis geográfica del estado de Tlaxcala, con anexo cartográfico. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F.
- Jensen, J. R. 1986. *Introductory Digital Image Processing: a remote sensing perspective*. 2nd ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Kolejka, J. and R. J. Petch. 1991. Evaluation of the processing methods of remote sensing for the establishments of the soil erosion on the monitored territory of the Stredomorawske Karpaty mountains. *Zpravy Geografickeho Ustavu. CSAV.* 28: 55-74.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. 3rd ed. John Wiley. New York, NY, USA.
- Martínez-Ríos, J. J. and H. Curtis Monger. 2002. Soil classification in arid lands with Thematic Mapper data. *Terra* 20: 89-100.
- Morgan, R. P. C. 1979. *Soil erosion and conservation*. John Wiley. New York, NY, USA.
- OET-CGE. 2002. Programa de Ordenamiento Ecológico General del Estado de Tlaxcala. Coordinación General de Ecología, Gobierno del estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax., México.
- Terrazas, D. S. y C. A. Ortiz S. 1992. Interpretación automática de tipos de erosión a partir de la digitalización de ortofotografías. *Agrociencia* 3: 33-44.
- Werner, G. 1986. Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano. Universidad Autónoma de Tlaxcala-Centro de Estudios Municipales. Tlaxcala, Tlax., México.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra Número Esp.* 10: 318-331.
- Zárate Z., R., M. Anaya-G., C. Ortiz-S. y M. E. Ramírez-G. 1991. Diagnóstico y control de la degradación de la tierra en el estado de Tlaxcala. *Agrociencia* 2: 59-81.