

Simulación de pérdida de suelo en la cuenca del lago de Pátzcuaro a partir de sistemas de manejo agrícola con percepción remota

Luis Mario Tapia Vargas
Mario Tiscareño López

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Alfredo Amador

Universidad Michoacana, México

Demetrio Fernández O.

Colegio de Postgraduados, México

Alma Delia Báez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

La degradación de los recursos naturales del estado de Michoacán, México, alcanza su punto máximo en la cuenca del lago de Pátzcuaro, el cual no ha podido rehabilitarse a pesar de millonarias inversiones. La erosión del suelo es el principal factor del deterioro y disminución del volumen de almacenamiento y de infiltración del agua de lluvia. La práctica de agricultura con labranza convencional ha acentuado el problema, al aumentar la frontera agrícola a expensas de la deforestación autorizada o clandestina. En contraste, la labranza de conservación ha probado ser efectiva al reducir tanto la pérdida de suelo como el escurrimiento superficial. El objetivo de este trabajo fue aplicar modelos empíricos de erosión a información basada en datos de satélite, para efectuar simulaciones de erosión del suelo y regionalizar y cuantificar las áreas de mayor aporte de contaminantes al lago. Los tratamientos evaluados fueron ecuaciones de erosión de labranza convencional (CT) y no labranza, con 100% de cobertura residual (NT-100%). La imagen de satélite que se utilizó fue la LANDSAT-TM multispectral de seis bandas, treinta metros de resolución espacial, con fecha de abril de 1994. Fue corregida y georreferenciada con el SIG IDRISI 2.0 para Windows. Se efectuó la clasificación supervisada con campos de entrenamiento y asignación de firmas espectrales, de cada cubierta, a una imagen compuesta seleccionada con base en una mejor visualización. Se aplicó el modelo de erosión en cada tratamiento en la imagen clasificada y se trató con el modelo de elevación digital de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los resultados obtenidos indicaron que CT tiene un rendimiento promedio de 6.9 ton/ha de sedimentos, mientras que NT-100 sólo rinde 1.3 ton/ha. La CT afecta aproximadamente 26% del área de la cuenca y el NT-100 sólo afecta 8.1% del área. Este análisis es una alternativa para regionalizar, cuantificar, modelar y prevenir las fuentes de erosión de la cuenca del lago de Pátzcuaro.

Palabras clave: percepción remota, simulación de cuencas, erosión del suelo.

Introducción

Los procesos de degradación que han ocurrido en la cuenca del lago de Pátzcuaro desde la introducción de la agricultura hace 3,500 años, aproximadamente

(O'Hara *et al.*, 1993), se han acentuado por la deforestación y el cultivo de laderas deforestadas. Sin embargo, las condiciones de máximo deterioro se han agudizado en los últimos cincuenta años, en los que la degradación de la cuenca puede apreciarse en el área

perdida por el vaso de almacenamiento, que actualmente alcanza 70 ha/año (Tiscareño *et al.*, 1999). El método de producción actual, que implica movimiento de suelo y prácticas de cultivo inapropiadas, propicia la erosión y el transporte de partículas. Estas prácticas, como la recolección de residuos de cosecha, el pastoreo directo, el barbecho, la cruza, el surcado, etcétera, alientan la ausencia de cobertura vegetal a la siembra del cultivo, justo cuando la temporada de lluvias presenta tormentas de corta duración y alta intensidad que ocasionan salida de sedimentos y escurrimientos fuera de las unidades de producción.

El lago de Pátzcuaro, situado en la cota más baja de la cuenca endorreica, ocasiona que las partículas desprendidas en las parcelas agrícolas por los procesos hidrológicos pasen a formar parte del cuerpo de agua y después, por simple acumulación, afloran del espejo de agua para formar tierra firme con el tiempo, al grado de unir islas y reducir el volumen de almacenamiento de agua del lago. De hecho, han desaparecido islas completas para integrarse a tierra firme, como es el caso de Jarácuaro y el archipiélago de Urandén. El deterioro ha llegado a tal grado, que el intento por proponer a la región como Patrimonio Cultural y Natural de la Humanidad, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura fue rechazado, porque las condiciones actuales del lago no garantizan un adecuado estado de conservación (Hiriart, 1999).

La evaluación y determinación de los procesos hidrológicos de más de 35,000 ha de agricultura de temporal en ladera es indispensable en cualquier esfuerzo que se realice para conservar y rehabilitar la cuenca, pero es casi imposible hacerlo de manera directa en campo debido al número de experimentos, equipo de medición, costos de operación y tiempo para la formación de la base de datos que ello implica (Sheng *et al.*, 1997). Por otro lado, la alternativa que ofrece mejores prácticas agrícolas, como la labranza de conservación y el uso de cobertura de residuo vegetal, también es difícil de evaluar en forma directa a gran escala.

Se requiere un medio que permita, con base en la información disponible generada en investigación de campo, ejecutar análisis que incluyan diferentes escenarios de manejo y cuya implementación en campo es virtualmente imposible (Jürgens y Fander, 1993). Una técnica eficaz, rápida y de bajo costo para ubicar el problema de erosión es la teledetección o percepción remota, la cual ha adquirido mayor importancia debido a los avances tecnológicos en todas las ramas de la computación (Rivera, 1996).

Los sistemas de información geográfica (SIG) pueden ejecutar análisis espacial de datos georreferencia-

dos para llegar rápidamente a la solución de un problema, al ponderar diferentes alternativas de manejo cuando diferentes intereses aparentemente entran en conflicto. Los SIG son una valiosa herramienta para definir y enfocar argumentos sobre las ventajas y desventajas de diferentes alternativas de uso de suelo (Green, 1992). Además, coadyuvan en la toma de decisiones que apoyen un desarrollo armónico de la sociedad con el medio ambiente, favoreciendo la convivencia con la naturaleza y el progreso, por medio de políticas sociales y ecológicas que no impacten negativamente el entorno (Fernández, 1996). Los cambios en la superficie del suelo, ocasionados por el hombre, pueden evaluarse utilizando percepción remota y SIG para medir, mapear, monitorear y modelar características y fenómenos ambientales (Estes, 1995).

El objetivo del presente estudio fue combinar información basada en percepción remota con resultados de modelación hidrológica, para efectuar simulación digital de salida de sedimentos y regionalizar las áreas de mayor aporte de contaminantes al lago por medio del Sistema de Información Geográfica.

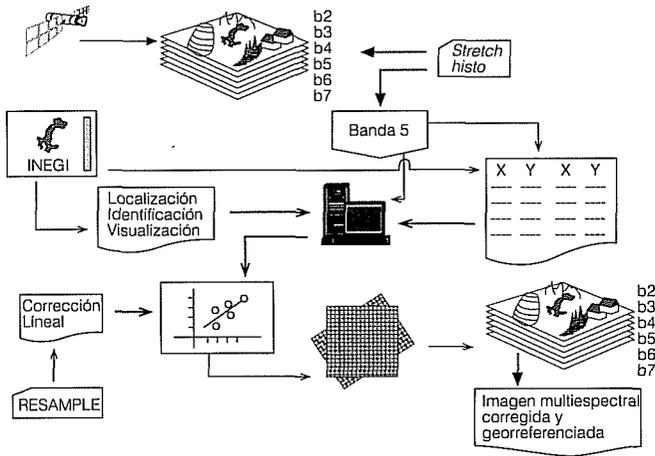
Materiales y métodos

Percepción remota

Se utilizó una imagen multiespectral del satélite *LANDSAT* de abril de 1994, con seis bandas del sensor TM en el espectro electromagnético. De acuerdo con Frensen y Gordon (1983), *LANDSAT* viaja en sincronía con el sol, en órbita sobre los polos norte y sur, a una altura de 700 km; efectúa 15 rotaciones a la Tierra por día y retorna al punto inicial cada 16 días. La escena completa cubre una superficie de 185 a 170 km en 24 segundos. La imagen contiene seis bandas correspondientes a los colores azul, verde, rojo, infrarrojo, infrarrojo cercano e infrarrojo lejano, en las longitudes de onda de 0.45-0.52, 0.52-0.60, 0.63-0.69, 0.76-0.90, 1.55-1.75 y 2.08-2.35 micrómetros, respecto a los colores citados. Dichas bandas tuvieron una resolución de 30 m en el tamaño del pixel.

La imagen fue proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Sus características principales son: formato binario y datos tipo *byte*, y un sistema de referencia plano con unidades en metros. Se obtuvo un recorte aproximado de la extensión de la cuenca del lago de Pátzcuaro, que correspondió a 4,000 columnas y 2,500 hileras del extremo inferior izquierdo. El recorte se obtuvo con el módulo Window del SIG *IDRISI* (Eastman, 1992) e igual que el resto de los procesamientos efectuados a la imagen, se realizaron con el SIG *IDRISI*, versión 2.0 para Windows.

Ilustración 1. Corrección geométrica y georreferenciación de la imagen original.



El procesamiento de la imagen se desarrolló de acuerdo con la ilustración 1. El primer paso consistió en la georreferenciación y corrección geométrica; la corrección radiométrica no fue necesaria debido a que el estudio no es multitemporal, más bien es de aplicación, por lo que el proceso de corrección puede evitarse (Chuvioco, 1990). Una vez obtenido el recorte, la imagen fue procesada con el módulo *Stretch*, con contraste de saturación lineal de 5% para ofrecer un mejoramiento visual e identificar los puntos de control y su posición dentro de las coordenadas de la imagen. La banda seleccionada para este análisis fue la infrarroja media, ya que resultó ser la de mejor visualización de coberturas y características físicas de la cuenca. El algoritmo en el que se basa el mejoramiento visual por contraste de la imagen (Colby *et al.*, 1983) está dado por:

$$V_i = \frac{I - K}{I_{m\acute{a}x} - K} * 255$$

donde:

- I = nivel digital del pixel de entrada
- V_i = nivel digital del pixel de salida
- K = constante de ajuste de forma de la curva ($K=I_{m\acute{i}n}$ en contraste lineal)

Cada punto de control de la imagen se cotejó con su posición geográfica en las cartas topográficas, 1:50,000 del INEGI (E14A22, E14A21, E14A31 y E14A32) o con los valores encontrados mediante recorridos de campo con navegación digital y valores registrados con el geoposicionador *Garmin* 12 XL de 12 canales. Se seleccionaron 50 puntos ampliamente dis-

tribuidos en la cuenca, de los que se rechazaron 16 por su alto valor de RMS hasta disminuir el valor de RMS total a 1/2 pixel (<15 m). El archivo de puntos fue creado en *DOS* y consistió en cuatro columnas de puntos en las coordenadas de la imagen y las correspondientes coordenadas de las cartas del INEGI o del geoposicionador. Dentro del módulo *Resample*, se seleccionó la función lineal para transferir las coordenadas de la imagen antigua a la nueva, así como para transferir los niveles digitales a su nueva posición por el método del vecino más cercano, de acuerdo con lo descrito por Pinedo *et al.*, (1996). En la ilustración 1 se indica la secuencia de pasos en el procesamiento de la imagen original.

Modelo de elevación digital

En el INEGI se adquirió el modelo de elevación digital de la cuenca en cuatro disquetes que corresponden a las cartas topográficas E14A22, E14A21, E14A31 y E14A32. El modelo se obtuvo por percepción remota, con una resolución de 20 m cada punto. Las cuatro cartas se unieron con el comando *Concat* del Sistema de Información Geográfica.

Modelo hidrológico de erosión y tratamientos

En un estudio previo de campo conducido bajo lluvia natural en los ciclos primavera-verano de 1996 y 1997 (Tapia, 1999), se aplicó el modelo de erosión *GLEAMS* (*Groundwater Effects of Agricultural Management Systems*) a los datos de producción de sedimentos de los tratamientos de labranza convencional (CT) y no labranza, con 100% de cobertura residual del suelo (NT-100) para cada evento de lluvia. *GLEAMS* es un modelo de simulación continua, cuyo componente de erosión se basa en ecuaciones diferenciales, en el que la salida de sedimentos está en función de la capacidad de erosión del suelo y de la capacidad de transporte del flujo (Foster *et al.*, 1980). La CT es la forma normal cultivar el maíz en la región y consiste en labranza con movimiento de suelo, mientras que NT-100 es la alternativa propuesta para reducir la salida de partículas de las unidades agrícolas. Por su naturaleza, ambos tratamientos son antagónicos. Las ecuaciones obtenidas de salida de sedimentos (t/ha) en función de la pendiente (%), con el modelo calibrado y validado (Tapia, 1999) tienen la forma siguiente:

Tratamiento Ecuación

CT	Sedimentos = 1.067 $e^{0.1151 S_0}$	$R^2 = 0.90$
NT-100	Sedimentos = 0.168 $e^{0.1227 S_0}$	$R^2 = 0.88$

donde:

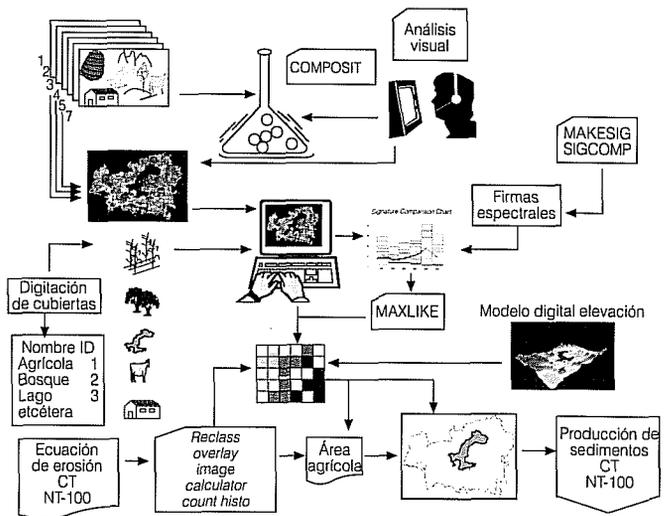
- CT = labranza convencional sin cobertura vegetal
- NT-100 = no labranza con 100% de cobertura residual
- S_o = pendiente del suelo (%)

Clasificación supervisada

Se analizaron y evaluaron de manera visual veinte composiciones, en combinaciones de tres, de las seis bandas de la imagen corregida y referenciada, para identificar la composición con cubiertas claramente diferenciables y visibles, y seleccionar los diferentes usos del suelo (ilustración 2). Así, mediante el módulo *Composit* se corrieron las diferentes bandas de la imagen con y sin contraste, además de las composiciones *NDVI*, *TassCap* y *Ratio*. La mejor imagen correspondió a la composición 3, 4, 5, a la que se le aplicaron cañones de rayos catódicos azul, verde y rojo en las bandas señaladas, con saturación lineal de cinco por ciento.

Con la clasificación supervisada se identificaron coberturas del suelo a partir de campos de entrenamiento, visualizados e identificados previamente en recorridos de campo o directamente en la imagen. La información de campo fue referenciada con el geoposicionador. La digitalización de los campos de entrenamiento se efectuó con el módulo *Display* y la opción *d* para digitalizar directamente en pantalla. Cada cubierta se identificó con un número hasta totalizar seis cubiertas principales, entre las que destaca la cobertura agrícola de temporal, ya que es la materia de este estudio, por lo que las demás cubiertas (inclusive la agricultura de riego) se usaron sólo para separar mejor la cubierta agrícola de temporal en la imagen clasificada (ilustración 2). Ello obedece a que el resto de las cubiertas, bosque, lago, agricultura de riego (por su topografía plana) y matorrales, no son fuente importante de sedimentos para el lago. En el cuadro 1 se muestra la información que se requirió para la clasificación supervisada de la imagen compuesta, correspondiente a la cuenca del lago de Pátzcuaro.

Ilustración 2. Clasificación supervisada de la imagen original.



Una vez digitalizados los campos de entrenamiento, se procedió a evaluar su firma espectral en las tres bandas de la imagen compuesta, a fin de estimar el proceso de clasificación. Se espera que las firmas espectrales de cada cobertura se identifiquen plenamente y se separen en cada banda de la imagen compuesta para una mejor clasificación (Chuvienco, 1990). El módulo empleado para formar las firmas espectrales de cada cobertura fue *Makesig*, mientras que para desplegarlas en cada banda de la imagen se usó el *Sigcomp* (ilustración 2). Una vez efectuado el proceso descrito, la imagen compuesta se clasificó mediante el método de máxima probabilidad (*Maxlike*), ya que es el que mejores resultados ofrece cuando los campos de entrenamiento han sido bien identificados y separados (Eastman, 1992).

La imagen seleccionada se reclasificó con el módulo *Reclass* para separar las áreas agrícolas y se evaluó con el modelo de elevación digital, a fin de obtener la imagen de pendientes y áreas agrícolas con el módulo

Cuadro 1. Fuentes de información para clasificación supervisada en la cuenca de Pátzcuaro.

Percepción remota	Información de campo	SIG	Salidas
Agricultura de temporal	Modelo de erosión	Módulos análisis	Producción de sedimentos
Bosque	$Sedim = a * e^{(b * S_o)}$		
Bosque degradado o matorral	Campos de entrenamiento	Modelo de elevación digital	Localización de fuentes importantes
Agricultura de riego			Cuantificación de sedimentos
Lago			
Zona urbana			Diferenciación de tratamientos

Cuadro 2. Características de la banda infrarroja cercana con y sin mejoramiento visual.

Tratamiento	Valor mínimo	Valor máximo	Media	Desviación estándar	Coef. var. %
Sin realce	0	255	52.3	20.3	38.8
Con realce	0	255	118	74.6	63.2

Overlay. La imagen de pendientes y agricultura se valoró con el modelo de erosión y así obtener la producción de sedimentos de cada parcela con el módulo *Image Calculator*. Los módulos *Reclass*, *Extract*, *Overlay*, *Count* e *Histo* se emplearon para separar el efecto y cuantificar la producción de sedimentos en las parcelas agrícolas de las del resto de la cuenca (ilustración 2).

Resultados y discusión

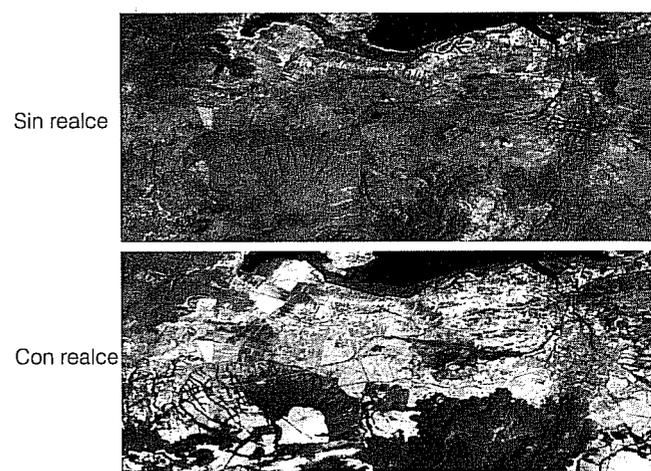
Mejora de la imagen original

La diferencias se pueden apreciar en la ilustración 3, en la cual la banda espectral infrarrojo medio fue sometida al realce de sus niveles digitales para localizar los puntos de corrección geométrica y georreferenciación, debido a que esta banda distingue perfectamente la vegetación y el suelo barbechado o en descanso, por el contraste en sus firmas espectrales (Soria *et al.*, 1998). Como se aprecia, la imagen de mayor calidad permitió apreciar mejor los caracteres de la región; los cruces de carreteras y los puntos de inflexión se reconocen perfectamente, lo que permite correlacionar sus coordenadas con los de las cartas topográficas del INEGI y los recorridos de campo con el geoposicionador.

Las parcelas agrícolas de riego y temporal son claramente diferenciables en la imagen mejorada, mientras que en la imagen sin mejorar resultan confusas. En la imagen sin tratamiento, la carretera Pátzcuaro-Uruapan aparece como un esbozo, mientras que en la imagen mejorada está bien definida. Otras características que pueden apreciarse son el cerro del Estribo, el libramiento poniente de Pátzcuaro, el entronque del libramiento con el de la carretera al muelle y el entronque Tzurúmutaro, entre otros. En el cuadro 2 se advierte la diferencia en el contenido de la imagen con el realce de los niveles digitales.

La diferencia en los valores de los niveles digitales es mayor en la imagen realzada, lo que permite diferenciar características de control; la mayor variabilidad en la imagen realzada favorece un mejor reconocimiento de las propiedades físicas del área de estudio, mientras que en la imagen sin realce, las propiedades aparecen en un gris continuo. Este mismo efecto lo ob-

Ilustración 3. Fracción de la banda infrarroja cercana con y sin realce para identificar puntos de control y caracteres principales para corrección geométrica y georreferenciación.



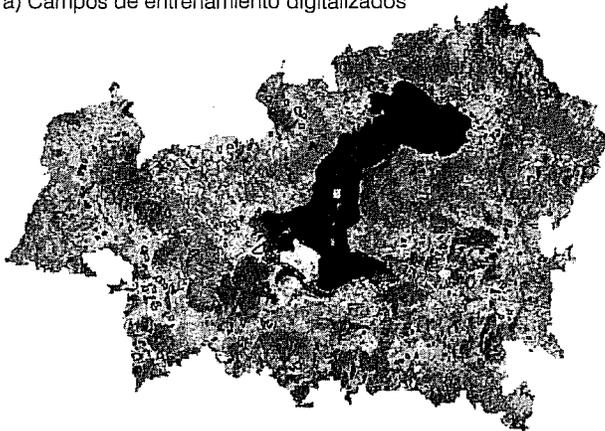
servó Ponce (1998) en el mejoramiento de la imagen por medio del realce. La diferencia en la visualización se debe a que los niveles digitales se distribuyen linealmente entre los límites 0 y 255, lo cual se comprueba al observar el valor medio de ambas imágenes, a pesar de que las dos presentan límites iguales en los niveles digitales.

Clasificación supervisada

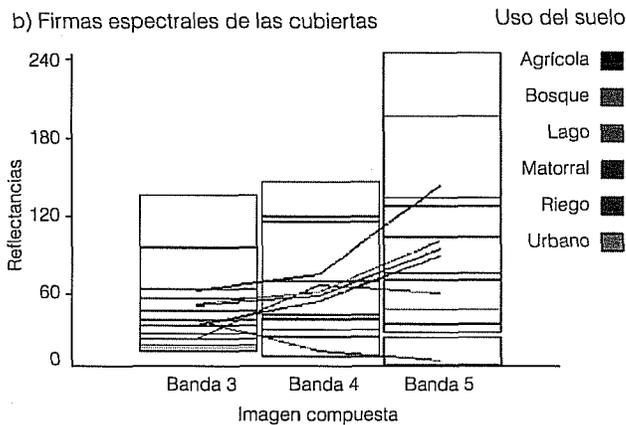
En la ilustración 4 se presenta la imagen compuesta seleccionada para la clasificación. La imagen compuesta produce un efecto cercano al color verdadero y a diferencia de la composición en falso color (2, 3, 4), discrimina muy bien las cubiertas forestales vigorosas de las aguas profundas. La imagen compuesta seleccionada muestra que una cubierta de color verde o color claro corresponde a una superficie con altas reflectancias en los canales TM3, TM4 y TM5, bandas a las que se les asignaron los respectivos cañones de rayos catódicos azul, verde y rojo. Conociendo el sello espectral típico de la vegetación, esta parcela debe corresponder a una cubierta con actividad clorofílica o, en su caso, a una cubierta sin vegetación en la fecha de toma de imagen. La información se complementa

Ilustración 4. Identificación de cubiertas de uso de suelo y firmas espectrales en la imagen compuesta seleccionada.

a) Campos de entrenamiento digitalizados



b) Firmas espectrales de las cubiertas



con el conocimiento de la región y el calendario agrícola para deducir la posible ocupación del suelo.

En la ilustración 4 se aprecia el vector digital delimitado para separar las diferentes coberturas, que se efectuó con el auxilio del recorrido de campo, las cartas del INEGI y la visualización directa en la imagen. Se delimitaron las coberturas agrícola, de bosque, de matorrales, del lago y de las áreas de riego (ilustración 4).

Las firmas espectrales de cada cobertura aparecen en la recién citada ilustración y como se puede ver, la separación de las firmas es diferente en cada banda, apreciándose una mejor diferenciación en la banda 5, lo cual confirma que en la medida en que existe una separación más definida en las diferentes bandas de la imagen de las firmas espectrales, la clasificación arrojará mejores resultados (Chuvienco, 1990).

Una vez vectorizados los campos de entrenamiento, se procedió a incorporarlos al resto de la imagen para obtener la imagen clasificada, mediante el método

Cuadro 3. Coberturas del suelo delimitadas por clasificación supervisada.

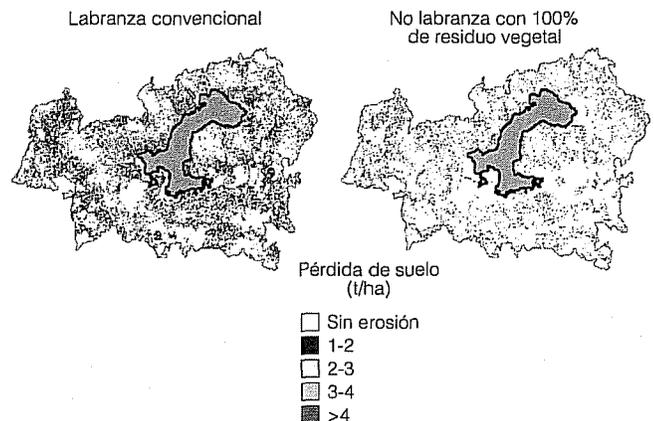
Cluster	Uso de suelo	Área delimitada (km ²)	Área reportada ¹ (km ²)
1	Agricultura de temporal	336.7	359.6
2	Forestal	205.3	280.1
3	Matorrales y pastizales	195.9	137.4
4	Lago	80.5	125.5
5	Urbano	100.9	-

¹ Fuente: Gómez, 1994.

de máxima probabilidad, dando igual ponderación a todas las firmas espectrales para los dos tratamientos de labranza. En el cuadro 3 se muestran las superficies ocupadas por las coberturas en la imagen clasificada, donde se tiene la reducción en la superficie forestal (en relación con la reportada por Gómez, 1994), la reducción de la superficie del lago y el incremento de las áreas de matorral y pastizal, mientras que en ambos casos, la superficie agrícola de temporal es semejante (336.7 y 359.6 km²).

La ilustración 5 resulta de la aplicación del modelo de erosión a la imagen clasificada, donde claramente se aprecia la distribución, regionalización y cuantificación de las salidas de sedimentos de las unidades agrícolas. Se advierte que la ribera del lago es un importante productor de sedimentos, esto se acentúa por la intensidad del color rojo en la labranza convencional; mientras que el tratamiento alternativo reduce sensiblemente el aporte de sedimentos, lo que se aprecia

Ilustración 5. Comparación de tratamientos de labranza en producción de sedimentos en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Mich. Clasificación supervisada.



en la menor intensidad de color distribuido a lo largo de la ribera y en toda la cuenca en general.

Además de una menor coloración en el tratamiento alternativo, su distribución en la cuenca también se reduce, por lo que un área menor aporta menos sedimentos, en comparación con la mayor extensión del tratamiento convencional, ello se puede apreciar por el número de píxeles coloreados que alcanzan ambos tratamientos, cuya diferencia es claramente contrastante.

En general, la aportación de sedimentos se distribuye en toda la cuenca, aunque existe una tendencia mayor en la porción oriental, suroriental, norte y norponiente. En el cuadro 4 se inscribe el área de contribución de sedimentos de cada tratamiento, encontrándose una marcada diferencia en el área de aportación tanto en la zona de producción total como en los diferentes rangos de erosión. Lo más significativo es el incremento en el área de no producción por efecto del tratamiento no-labranza-100%, ya que mientras en CT se tienen 67,679 ha que carecen de erosión, en NT-100% esta superficie se incrementa a 84,452 hectáreas.

Ello significa que el actual sistema de producción tiene una cobertura de sólo 26.4% del área total de la cuenca; sin embargo, produce 6.9 ton/ha de sedimentos. En contrapartida, NT-100 sólo afecta a 8.1% del área de la cuenca y produce 1.3 ton/ha, lo cual significa 72% de la erosión máxima permisible (Colegio de Postgraduados, 1991), mientras que CT arroja un 383% superior a la misma cantidad máxima. Dickey *et al.* (1986) también demostraron que la erosión con labranza convencional se incrementa en 1000%, en relación con la erosión producida con labranza de conservación, destacando la importancia de la cobertura en la atenuación del problema.

La ventaja de la caracterización del fenómeno por este método (clasificación supervisada) es que la información obtenida es más confiable. Ello se debe a

que la imagen de satélite basada en información de campo es fehacientemente comprobada (Eastman, 1992). La precisión del método de clasificación para cartografiar electrónicamente cubiertas de uso semejante es aceptable, al compararla con la cartografía tradicional efectuada en trabajos anteriores, en los que las diferencias básicamente son resultado del continuo cambio en el uso del suelo de la cuenca (cuadro 3).

Conclusiones

Los programas permanentes de dragado del lago de Pátzcuaro carecen de sentido si no se ataca la causa, sino al efecto de la erosión: la producción de sedimentos. Si la deforestación y el ulterior cambio de uso de suelo prosiguen (la tendencia predominante hasta ahora), la generación actual podrá presenciar la extinción del lago de Pátzcuaro, la cual se refuerza con el sistema de producción agrícola de temporal en ladera. Por su conformación física, la cuenca lacustre ayuda a la sedimentación de partículas desprendidas de las tierras altas en el vaso de almacenamiento.

La simulación digital de la erosión en la totalidad de la cuenca permitió conocer la gravedad del problema: más de 26,000 ha son fuente productora de sedimentos, con una producción media de 6.9 ton/ha; lamentablemente, una gran proporción de esa superficie limita con el lago o está cercana a su ribera. Por otra parte, la labranza de conservación puede reducir el área afectada a un tercio del área dañada (8,000 ha, aproximadamente); pero lo más importante es que la salida de sedimentos de las parcelas agrícolas disminuye de 6.9 ton/ha a sólo 1.2 ton/ha, lo cual es marcadamente inferior a la erosión máxima permisible.

Al localizar las fuentes de salida de sedimentos se detectó que en gran proporción se encuentran adyacentes a las riberas del lago, lo que contribuye a agudizar el problema, ya que salen de las unidades productivas y entran directamente al lago. Esto ha ocasionado la pérdida de superficie de agua y la cada vez más rápida eutrofización del lago. Las áreas que llevan sedimentos ubicadas en la periferia del la cuenca al menos pueden descargar parte de ellos en zonas de depósito al disminuir la pendiente. Sin embargo, dicho efecto no se cuantificó en este estudio, lo cual sugiere la necesidad de efectuar una investigación futura al respecto, para determinar con precisión los ingresos de sedimento al lago.

La simulación digital de erosión de suelos de ladera es una técnica idónea para coadyuvar a restaurar el equilibrio hidrológico del lago de Pátzcuaro, además de ser una alternativa inmediata y de bajo costo que permite localizar las fuentes más importantes de parti-

Cuadro 4. Superficie afectada por rango de erosión para cada sistema de manejo de suelo, clasificación supervisada.

Pérdida de suelo (t/ha)	Tratamiento	
	Labranza convencional (ha)	No labranza 100 % cobertura (ha)
0	67,679	84,452
1-2	7,815	3,504
2-3	3,499	1,374
3-4	3,091	724
>4	9,861	1,892
Media (t/ha)	6.9	1.3

culas. Por otra parte, deben promoverse las prácticas de manejo para controlar dichas partículas y, en zonas de alta producción de sedimentos, ensayar otras alternativas, como las obras de conservación de suelos o la reforestación. Es necesaria una investigación futura tanto para validar los resultados de la simulación como para evaluar el efecto de prácticas agrícolas más apropiadas para la zona y de prácticas de conservación que contribuyan a la retención de partículas de suelo dentro de las unidades de producción.

Recibido: 03/08/1999

Aprobado: 17/01/2001

Referencias

- Chacón, A., "El ecosistema lacustre", *Plan Pátzcuaro 2000: investigación multidisciplinaria para el desarrollo sostenible*, Fundación Friedrich Ebert Stiftung, México, 1992, 320 pp.
- Chuvieco, E., *Fundamentos de teledetección espacial*, Rialp, Madrid, 1990, 419 pp.
- Colby, C., S.W. Murphy y S.P. Snyder, *Image geometry and rectification In: Manual of Remote Sensing*, Coldwell, R.N. (editor), American Society of Photogrammetry, Falls Church Va., 1983, pp. 873-922.
- Colegio de Postgraduados, *Manual de conservación de suelo y agua*, 3ª ed., Chapingo, México, 1991, 227 pp.
- Dickey, C.E., D.P. Shelton y P.J. Jasa, "Residue Management for Soil Erosion Control, Neb Guide", G-8, University of Nebraska, 1986, 4 pp.
- Eastman, R.J., *IDRISI User's guide*, Clark University, Worcester, Massachusetts, USA, 1992, 178 pp.
- Estes, E.J., "Global Change Remote Sensing'S Challenge as We Approach the Millenia", *Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, Puerto Vallarta, México, 1995, pág. 1.
- Freden, S.C. y F. Gordon, "Landsat Satellites", *Manual of Remote Sensing*, Coldwell, R.N. (editor), American Society of Photogrammetry, Falls Church Va., 1983, pp. 517-570.
- Fernández, O.Y., *Sistemas de información espacial*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 1996, pág. 1.
- Foster, G.R., L.J. Lane, J.D. Nowlin, J.M. Laflen y R.A. Young, "A Model to Estimate Sediment Yield from Field-Sized Areas Development of Model. *CREAMS* a Field Scale Model for Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems", *Conservation Research Report*, vol. 26, USDA, 1980, pp. 36-64.
- Green, K., "Spatial Imagery and GIS", *Journal of Forestry*, vol. 90, núm. 11, 1980, pp. 32-34.
- Gómez, T.A., *Tres niveles de erosión en la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán, como base para acciones y obras de conservación*, folleto técnico, vol. 26, INIFAP, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1994, 18 pp.
- Hiriart, C.P., *Los sitios culturales de la cuenca del lago de Pátzcuaro*, INAH-Michoacán, Morelia, México, 1999, 15 pp.
- Jürgens, C. y M. Fander, "Soil Erosion Assessment by Means of Landsat-TM and Ancillary Digital Data in Relation to Water Quality", *Soil Technology*, CATENA 6, 1993, pp. 215-233.
- O'Hara, S.L., F.A. Street y T.P. Burt, "Accelerated Soil Erosion around a Mexican Highland Lake Caused by Prehispanic Agriculture", *Nature*, vol. 362, 1993, pp. 48-51.
- Pinedo, A.C., J. Jiménez C., J.R. Mendoza y R.M. Quintana, *Análisis de la cubierta aérea en bosques de Chihuahua a través de Landsat-TM*, 7ª. Reunión Nacional SELPER, México, 1996, pág. 4F.
- Ponce, C.J.E., *Clasificación de uso de suelo y vegetación en un área del estado de Tabasco, mediante imágenes de satélite*, tesis de maestría en ciencias, IRENAT-CP, 1998, 130 pp.
- Rivera, V.M., *Metodología para identificar formas de erosión a través de la interpretación automática de imágenes de satélite*, tesis de maestría en ciencias, IRENAT-CP, Montecillo, México, 1996, 97 pp.
- Sheng, T.C., R.E. Barret y T.R. Mitchell, "Using Geographic Information Systems for Watershed Classification and Rating in Developing Countries" *J. Soil and Water Conservation*, vol. 3, 1997, pp. 84-89.
- Soria, R. J., C.A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H., *Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales*, CP-CONACYT, 1998, 66 pp.
- Tapia, V.L.M., *Escurrimiento y producción de sedimentos en sistemas de manejo agrícola en la cuenca del lago de Pátzcuaro*, tesis de doctorado en ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 1999, 168 pp.
- Tiscareño, L.M., M. Tapia V., A.D. Báez G. y M. Velázquez V., "Simulación de lluvia para la caracterización hidrológica y de erosión de suelos bajo labranza convencional y labranza cero", *Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos*, libro científico 1, INIFAP-IRD-IWMI-ARS, 1999, pp.99-114.
- Whiting, M.L., S.D. de Gloria, A.S. Benson y S.L. Wall., "Estimating Conservation Tillage Residue Using Aerial Photography", *J. Soil Conservation*, vol. 3, 1989, pp. 130-132.

Abstract

Tapia Vargas, L.M., M. Tiscareño López, A. Amador, D. Fernández & A.D. Báez, "Simulation of Soil Erosion in the Lake of Patzcuaro Watershed, through the Use of Agricultural Systems with Remote Sensing", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 4, pages 107-115, October-December, 2001.

The natural resources deterioration of the state of Michoacan, México, reaches its peak point in the lake of Patzcuaro watershed. In despite of the millionaire investments, lake reclamation has been impossible. Soil erosion is the main source of damage and loss storage capacity of the lake. Conventional tillage has stressed soil loss mainly in hillslope deforested lands. Conservation tillage is an alternative effective to reduce both soil loss and surface runoff. The aim of this study was to apply empiric erosion models to satellite data in order to simulate soil erosion, and to locate and evaluate erosion source areas. The evaluated treatments were soil erosion models from conventional till (CT) and conservation till with 100% residue soil cover (NT-100). The satellite images Landsat-TM multispectral 6 bands, 30 m of spatial resolution taken on April of 1994, were analysed using GIS Idrisi 2.0 for Windows to correct and georeference the images. Training fields and spectral signatures were displayed and assigned to images issuing the classified image supervised. This image was evaluated with the digital elevation model and the erosion model of each treatment. Results indicated that CT accounts for 6.9 t/ha of sediment yield contrasting with 1.3 t/ha of NT-100. CT alters 26% of the watershed area while NT-100 may alter 8.1% of the area. This investigation is an alternative to locate, model and anticipate erosion sources of the Lake of Patzcuaro watershed.

Key words: remote sensing, watershed simulation, soil erosion.

Dirección institucional de los autores:

Luis Mario Tapia Vargas
Mario Tiscareño López
Alma Delia Báez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Avenida Latinoamericana 1110
60080 Uruapan, Michoacán, México.
Teléfono y fax (52) (4) 523 73 92
Correo electrónico: cefap@ulter.net

Alfredo Amador

Universidad Michoacana, México.

Demetrio Fernández O.

Colegio de Postgraduados, México.