

EROSIÓN EN CÁRCAVAS EN EL SISTEMA VOLCÁNICO TRANSMEXICANO.

Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico

Gerardo Bocco*
José Luis Palacio*
Carlos René Valenzuela**

Resumen

En este artículo se analiza el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (PR), validadas por observaciones de campo, como un medio para desarrollar modelos de dinámica de cárcavas en zonas de vulcanismo cuaternario. El 75% de las zonas erosionadas en las dos áreas de estudio se localiza en pendientes menores del 15%, y en unidades geomórficas de origen acumulativo, bajo agricultura o pastizal. Las áreas bajo riesgo a la erosión fueron establecidas mediante un modelo, validado en una segunda área de investigación. Se recomienda el uso de un enfoque similar para determinar prioridades en el planeamiento de la conservación de suelos y agua.

Summary

In this paper we report on the use of GIS and remote sensing techniques, validated by field observations, as means for modelling gully erosion dynamics in Quaternary volcanic terrains. 75% of actual gullied areas occurs on gently sloping (< 15% gradient), accumulative terrains, under rain-fed agriculture or grassland. Areas under severe gully erosion risk were predicted; the model was successfully applied to a different area of the same physiographic province. The approach is suggested for determining conservation priorities.

Introducción

Un inventario del medio ambiente es un componente esencial en la evaluación de fenómenos tales como la erosión en cárcavas. Un inventario proporciona datos cuantitativos acerca de procesos naturales y antrópicos y de sus interrelaciones. Estos datos pueden convertirse en información útil mediante un tratamiento adecuado en un sistema computarizado de información geográfica, basado en bancos de datos espaciales y tabulares.

Un sistema computarizado agudiza los cálculos y contribuye a un análisis interactivo (usuario/sistema) generando datos (mapas y tablas) preliminares o intermedios que

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 20-850, 01000 México, D. F.

** Instituto Internacional de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC), 7500 AA, Enschede, Países Bajos.

pueden ser evaluados visual y cuantitativamente. Los procedimientos que anteriormente se realizaban en forma manual pueden ejecutarse ahora de manera automatizada, guiando a la computadora de acuerdo con *a)* el conocimiento previo al tratamiento, *b)* nuevo conocimiento adquirido durante el procesamiento y *c)* los objetivos de la investigación. El conocimiento del intérprete es fundamental en el procesamiento y análisis de los datos.

Las cárcavas, que aparecen claramente en imágenes de satélite de alta resolución (tal como SPOT) o bien en fotografía aéreas, pueden mapearse utilizando técnicas estándar de fotointerpretación. Estos rasgos pueden georeferenciarse y cuantificarse utilizando técnicas simples de SIG.

Las imágenes estereoscópicas permiten, asimismo, el mapeo de unidades de terreno (UT). Además, la resolución espectral (banda infrarroja) de una composición multispectral ayuda al mapeo del uso del suelo basado en análisis de cobertura del terreno. En caso necesario, y cuando se disponga de fotografías a mayores escalas, se puede incorporar información adicional más detallada.

De requerirse, se pueden digitalizar mapas base o temáticos existentes. La información altitudinal contenida en el mapa topográfico permite la construcción de modelos digitales de terreno (MDT) y la derivación, entre otros, de mapas de pendiente. Combinando en el SIG los mapas apropiados, se puede determinar rápidamente las unidades de terreno, el uso del suelo y la pendiente correspondiente a las áreas erosionadas de la zona en estudio.

La explicación de un fenómeno ambiental, tal como la erosión en cárcavas, en términos de ciertas variables del paisaje (como formas del relieve, pendiente o uso del suelo) introduce la posibilidad de predecir la futura ocurrencia de fenómenos similares si un conjunto de condiciones, derivado del análisis, también ocurre. En otras palabras, un inventario puede proporcionar los datos básicos para desarrollar modelos espaciales.

En este trabajo se analiza el uso de técnicas de PR y de SIG, validadas por observaciones de campo, como una herramienta para el desarrollo de un modelo de dinámica de erosión en cárcavas en zonas de vulcanismo cuaternario bajo clima templado subhúmedo estacional. El enfoque fue probado en dos zonas del Sistema Volcánico Transversal (véase figura 1).

Materiales y método

En este estudio se usaron los siguientes materiales:

- Un par estereoscópico SPOT multispectral de octubre de 1987 (fin época de lluvias), a escala 1:100 000, de la cuenca del río Tlalpujahua.
- Fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro, de 1970, a escalas 1:25 000 y 1:50 000, que cubren el municipio de Huasca de Ocampo.
- Mapas topográficos (DGG) a escala 1:50 000, equidistante 10 m.
- Mapas temáticos (DGG) (suelos, uso del suelo, geología).

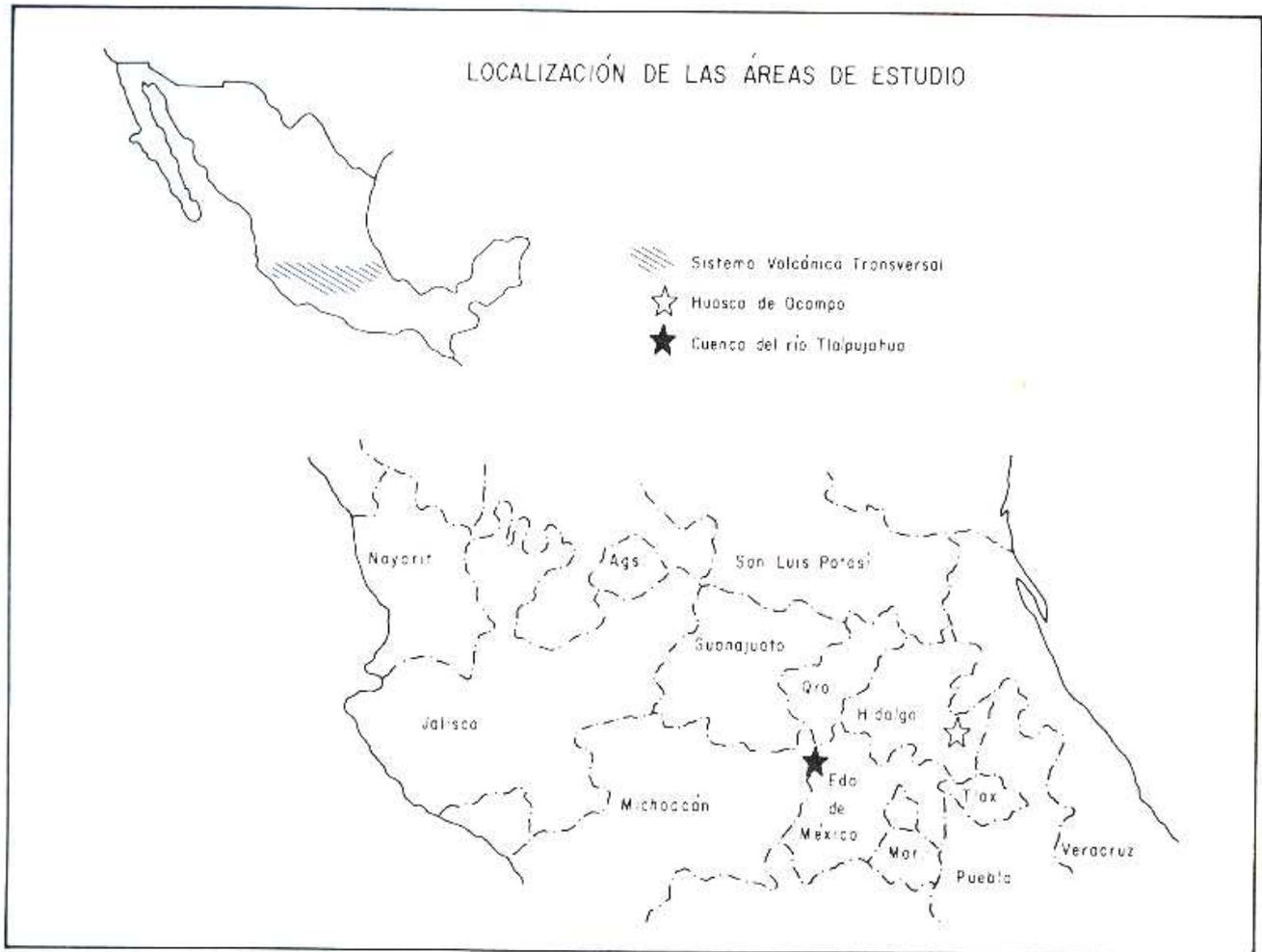


Figura 1. Localización de las zonas en estudio; cuenca del río Talpujahuá en los estados de México y Michoacán, y municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo.

El análisis se realizó utilizando el ILWIS (Integrated Land and Watershed Management Information System/Sistema de Información Integrada de Terreno y Manejo de Cuencas). ILWIS fue desarrollado en el Instituto Internacional de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC), en Enschede, Países Bajos.

El objetivo general del sistema es contribuir al mejoramiento de la disponibilidad y calidad de la información necesaria para llevar a cabo un manejo apropiado de cuencas hidrológicas, incluyendo erosión y sedimentación (Valenzuela, 1988).

ILWIS opera en una configuración pequeña y de relativamente bajo costo. El equipo (hardware) básico consiste en:

- Una microcomputadora (IBM-AT o compatible, MSDOS versión 2.0 o más reciente), con una memoria de acceso (RAM, *random access memory*) de 640 kbytes y un co-procesador matemático.
- Al menos un disco flexible (1.2 Mbytes) y un disco duro de por lo menos 20 Mbytes de almacenamiento.
- Monitor de alta resolución en color.
- Una tableta de digitalización Calcomp 2 000 o 9 100 con cursor.
- Impresoras estándar y de color.

La configuración del paquete de programas (software) fue diseñado para satisfacer los siguientes requerimientos (Gorte *et al.*, 1988):

- Aceptar datos en formato vectorial (por ejemplo, mapas digitalizados) y de celdas (*raster*; por ejemplo, imágenes de satélite en forma digital).
- Utilizar un banco de datos tabular.
- Incorporar o interaccionar con modelos descritos en la literatura o disponibles como programas (por ejemplo, modelos hidrológicos, de ordenamiento y utilización del terreno).

El subsistema de entrada de datos permite la captura de los mismos en las modalidades espacial (por ejemplo, unidades de mapeo, imágenes digitales de satélite) y no-espacial (atributos del suelo o datos puntuales). El sistema incluye el procesamiento convencional de imágenes de satélite (georeferenciación, mejoramiento y reconocimiento de patrones).

El método seguido para este trabajo se presenta, con más claridad, en la **figura 2**.

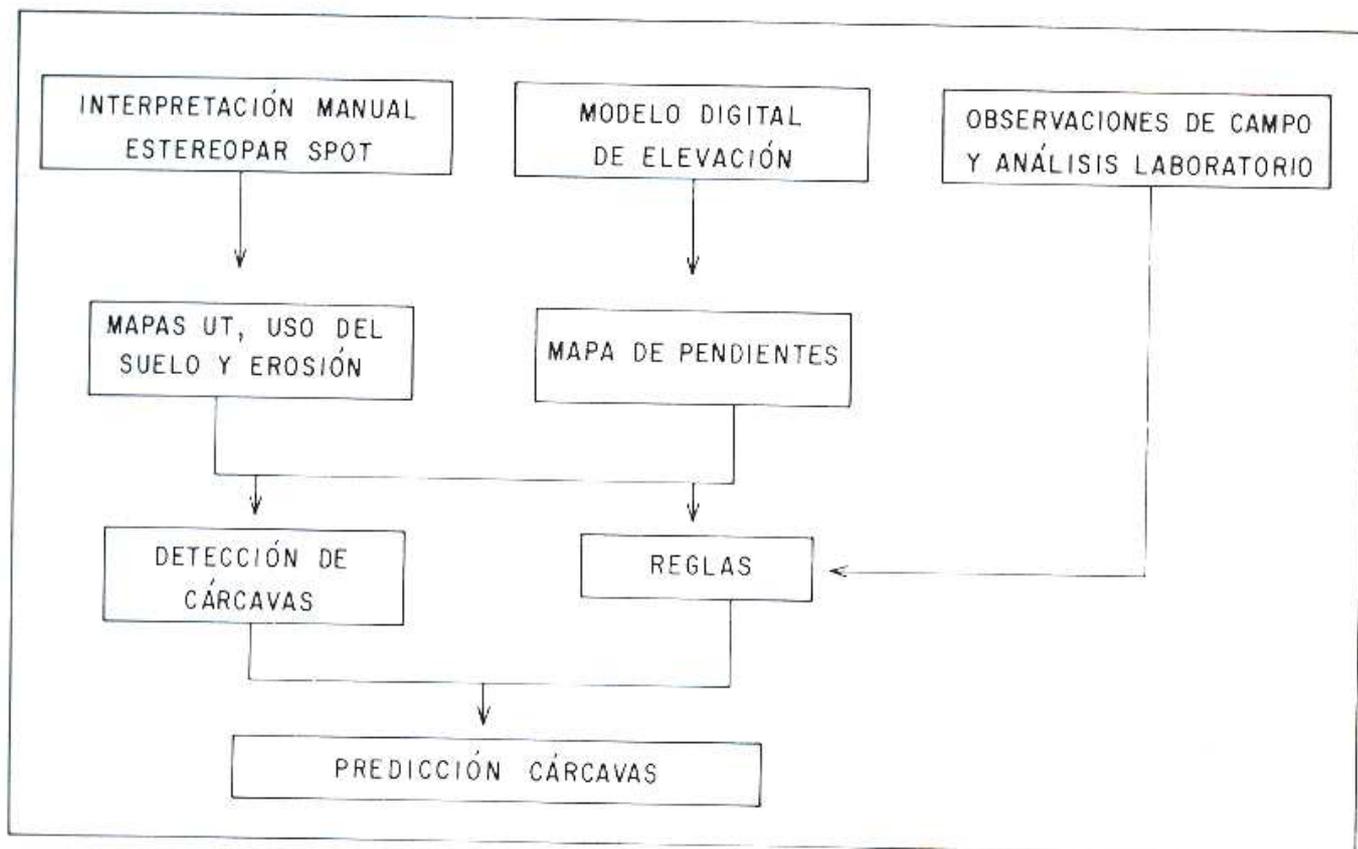


Figura 2. Diagrama del método seguido en el artículo.

Diseño de los bancos de datos

Los siguientes datos fueron incorporados al SIG mediante digitalización (exceptuando el mapa de pendientes) y posteriormente transformados al formato en celdas o matricial (*raster*):

a) Un mapa de unidades de terreno (UT, véanse figura 3 y tabla 1), derivado del par estereoscópico SPOT. Las UT resultan de segmentar el área en unidades de paisaje relativamente homogéneas. Están basadas, especialmente, en litología, génesis geomorfológica y morfometría (Meijerink, 1988).

Tabla 1. Unidades de terreno, pendiente y uso del suelo dominantes (Tlalpujahua)

Unidades de terreno	Á r e a		Pendiente dominante (en %)	Uso del suelo dominante	
	Hectáreas	%			
Origen Volcánico					
Volcanes					
1.	Estratovolcanes	7 479	15.30	>25	Bosque mixto
2.	Volcanes complejos	2 482	5.00	7-8	Agricultura de temporal
3.	Conos de escoria	342	0.70	>25	Bosque abierto
4.	Conos lávicos	858	1.80	>25	Bosque abierto
Flujos volcánicos					
5.	Andesíticos, cumbres	2 039	4.10	5-6	Agricultura de temporal
6.	Andesíticos, laderas	3 548	7.20	>25	Agricultura de temporal
7.	Ignimbríticos, cumbres	954	1.90	5-6	Pastizal
8.	Ignimbríticos, escarpes	52	0.10	>25	Bosque abierto
9.	Ignimbríticos, no dif.	189	0.40	>25	Pastizal
10.	Riolíticos, cumbres	303	0.60	7-8	Pastizal
11.	Riolíticos, laderas	303	1.00	>25	Bosque mixto
12.	Basálticos, cumbres	2 319	4.70	3-4	Agricultura de temporal
13.	Basálticos, laderas	1 127	2.30	>25	Bosque abierto
14.	Campos basálticos, c/tefra	4 084	8.30	3-4	Agricultura de temporal
15.	Campos basálticos	585	1.20	3-4	Agricultura de temporal
16.	Flujos lávicos, no dif.	713	1.40	7-8	Rain-fed agricult.
Origen volcánico denudatorio					
17.	Colinas piroclást., cumbres	370	0.70	3-4	Agricultura de temporal
18.	Colinas piroclást., laderas	1 355	2.80	3-4	Agricultura de temporal
19.	Piedemontes volcánicos	8228	16.80	5-6	Agricultura de temporal
20.	Valles erosivos en lavas	380	0.80	9-10	Bosque abierto
Origen denudatorio					
21.	Laderas en rocas metamórf.	5628	11.60	>25	Agricultura de temporal
22.	Piedemontes no-volcánicos	1 826	3.70	5-6	Agricultura de temporal
Origen fluvial y lacustre					
23.	Planicies fluviales	689	1.40	0-2	Agricultura de irrigación
24.	Planicies fluvio-lacustres	2 517	5.10	0.2	Agricultura de irrigación
	Presas	556	1.10		
	T o t a l	49 126	100.00		

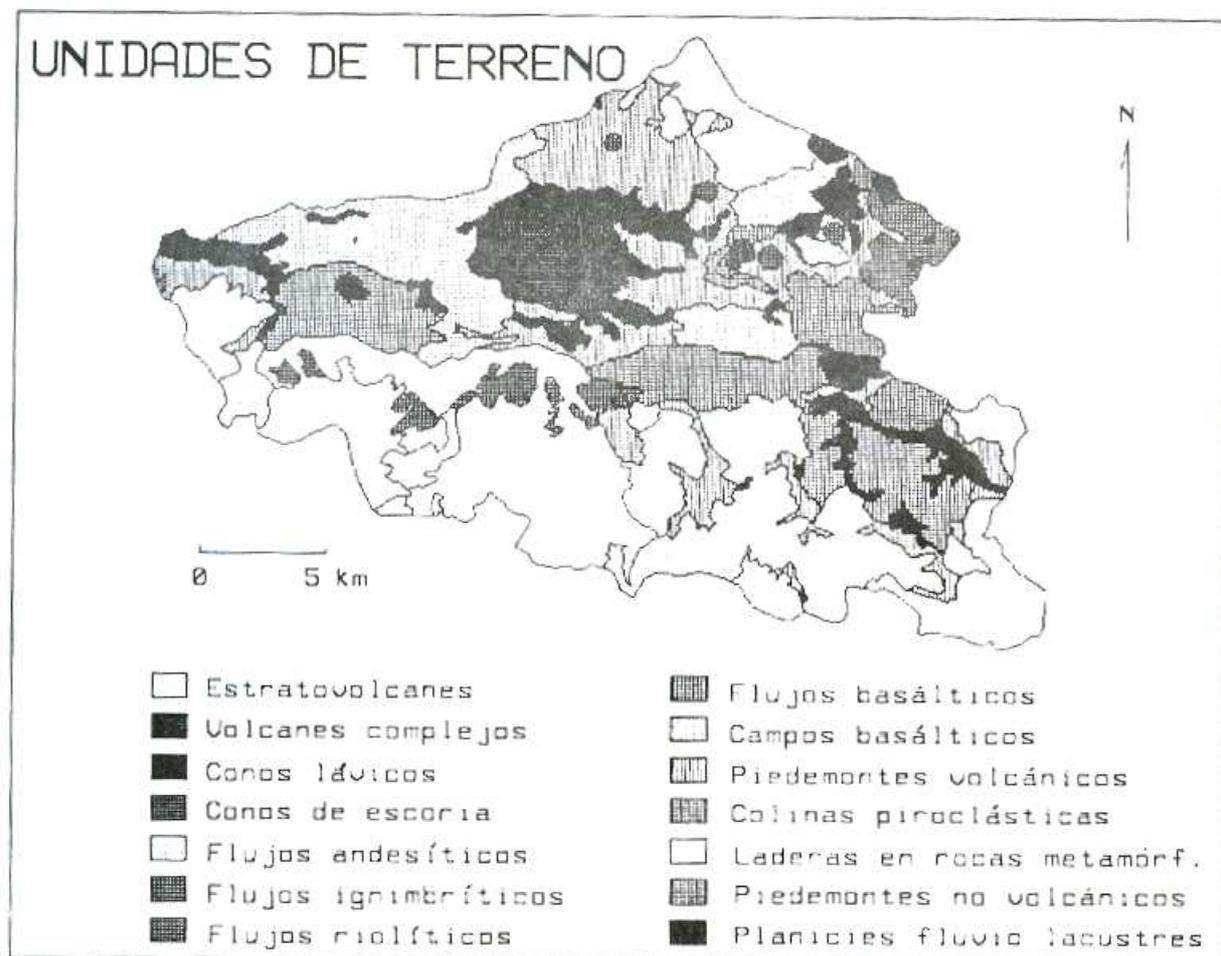


Figura 3. Mapa de unidades de terreno (UT).

Un análisis de varianza de atributos morfométricos (inclinación y longitud de la pendiente, amplitud del relieve) indicó que la inclinación de la pendiente es el atributo más importante en la explicación de la variabilidad entre y dentro de las unidades de terreno (Bocco, 1989a).

b) Un mapa de áreas afectadas por erosión en cárcavas, derivado del mismo par estereoscópico (figura 4). El terreno erosionado consiste básicamente en cárcavas en laderas, relativamente someras (en general, < 5 m de profundidad de disección); en algunos casos, por su extensión, constituyen verdaderos *bad-lands* (llamados localmente "barranqueras"). Las cárcavas pueden interpretarse fácilmente sobre la base de su tono, forma y patrón, en las imágenes. En este caso, las cárcavas presentan alta reflectancia en todas las bandas espectrales, son irregulares y representan rasgos geomórficos recientes en zonas acumulativas.

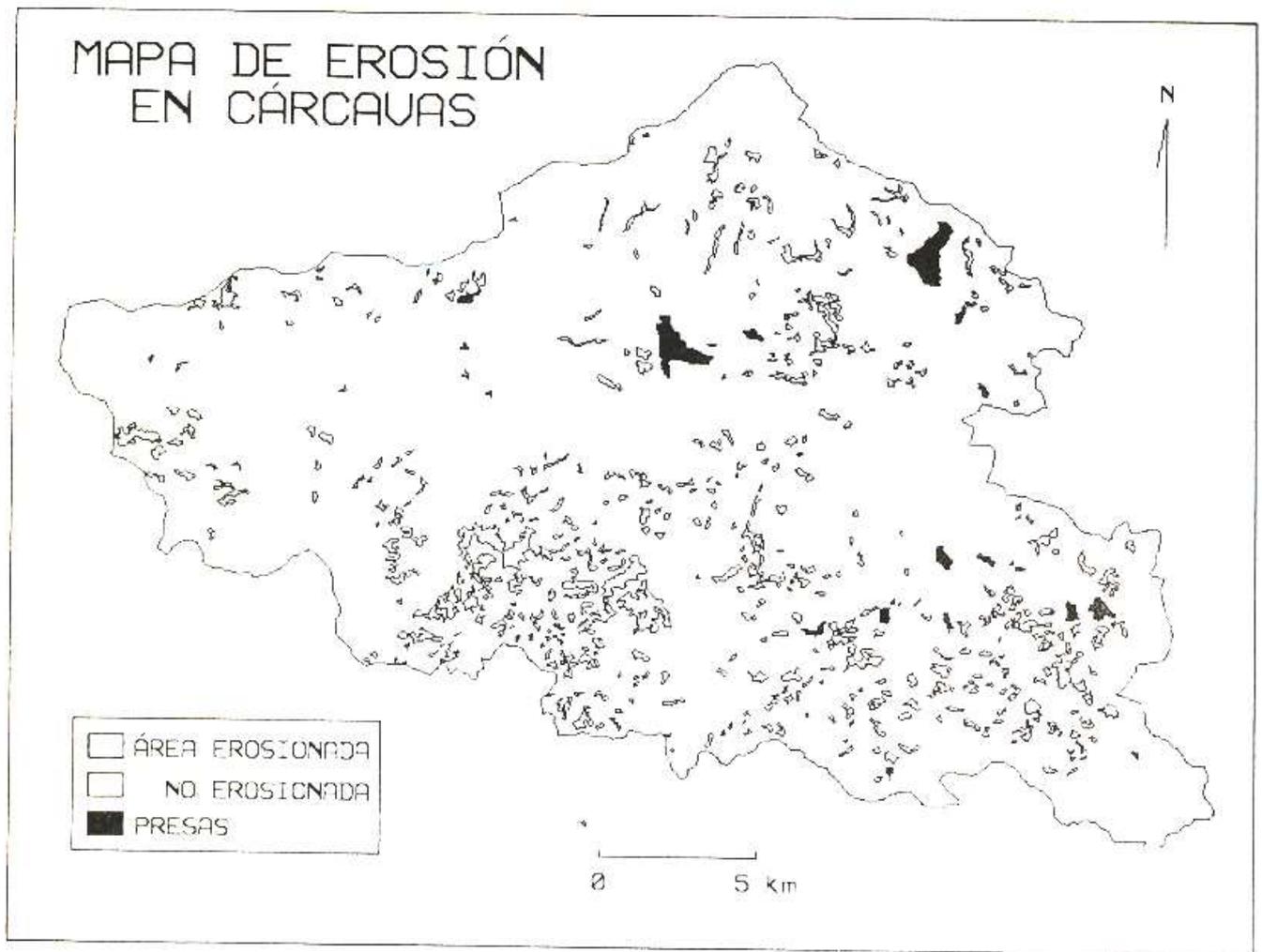


Figura 4. Mapa de erosión en cárcavas.

c) Un mapa de uso del suelo, obtenido de las mismas imágenes (figura 5). La interpretación del uso del suelo se basó principalmente en la información proporcionada por la banda infrarroja de la composición a color.

d) Un mapa de pendientes, basado en datos de elevación (curvas de nivel), digitalizados del mapa topográfico (figura 6). En las zonas montañosas se capturaron las curvas maestras (cada 50 m); en zonas de baja amplitud de relieve se digitalizó toda la información disponible. El mapa de pendientes fue preparado utilizando técnicas de filtrado direccional del modelo digital de terreno (MDT), directamente en formato en celdas.

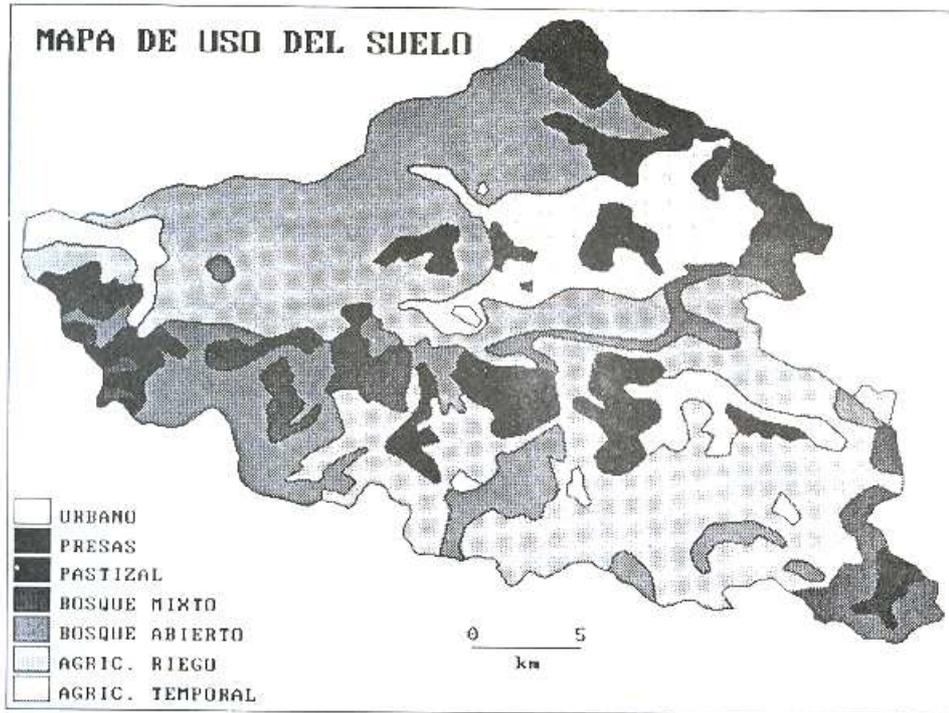


Figura 5. Mapa de uso del suelo.

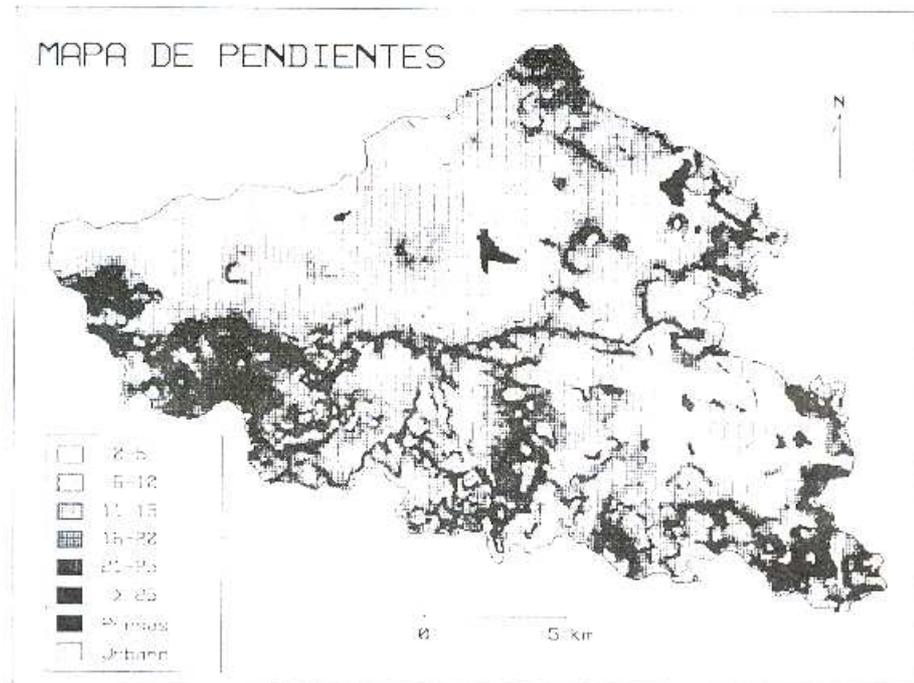


Figura 6. Mapa de pendientes.

Exactitud en los bancos de datos

Para indicar el grado de confiabilidad de los procedimientos y resultados alcanzados, siempre debe establecerse un umbral de precisión. Según Walsh *et al.* (1987), existen dos clases principales de error. El error inherente es aquél presente en los datos originales; y el operativo, que es el producido durante la captura y manipulación de datos dentro del SIG. Los errores pueden, aun, subdividirse en posicionales y de identificación.

Los límites de rasgos naturales (por ejemplo, una unidad de paisaje) no son, en general, líneas precisas en el terreno, sino áreas transicionales, donde se producen cambios graduales. En este sentido, y para este tipo de análisis, debe darse más importancia a los errores de identificación que a los de posición. Cuando los datos de entrada se derivan de imágenes, el error operativo es, en general, menor que el inherente (de identificación), introducido en las unidades de mapeo por: *a*) las generalizaciones que se producen durante la fotointerpretación (dentro de las unidades de mapeo y en los contactos), *b*) las limitaciones impuestas por la escala y *c*) la precisión intrínseca de las imágenes utilizadas.

Los mapas derivados de las imágenes SPOT fueron transformados geoméricamente a la proyección Universal Transformada de Mercator (UTM), utilizando 30 puntos de control y una precisión de 0.5 del tamaño de la celda (raíz cuadrada del error medio, rms). Todos los datos fueron transformados al formato en celdas; el tamaño de las celdas fue de 50 x 50 m. Estas dimensiones se eligieron teniendo en cuenta la escala del par estereoscópico (SPOT) (1:100 000), donde 0.5 mm en la imagen corresponden a 50 m en el terreno. La resolución de la imagen SPOT permite la detección visual de rasgos más pequeños que el umbral de precisión dado por el efecto conjunto del grosor de la línea y las imprecisiones producidas durante la digitalización (aproximadamente 0.5 mm). De este modo, se aceptó que la exactitud no sería mayor que 0.25 ha (0.5 x 0.5 mm en el mapa).

La exactitud de los mapas utilizados, sin embargo, es una función, principalmente, de la escala de la imagen de la que fueron obtenidos. La exactitud no será mejor que aquélla de los mapas dibujados manualmente, utilizando equipos fotogramétricos simples. En el caso que se utilicen mapas a escalas diversas, la exactitud final corresponderá a la escala más pequeña (Burrough, 1986). En otras palabras, el uso de SIG no implica un mejoramiento de la exactitud sino una mayor eficiencia en la obtención de la exactitud requerida.

Los datos fueron generalizados a niveles de agregación convenientes para la escala del análisis. Las unidades de terreno (UT) se consideraron de acuerdo con la unidad o subunidad; la diferenciación de subunidades se basó principalmente en la inclinación de la pendiente. El uso del suelo se dividió en siete categorías y las pendientes se clasificaron en nueve grupos, con mayor discriminación para las pendientes menores de 15%.

Resultados y discusión

Los cálculos con mapas resultan en bancos de datos tabulares, que pueden ser manipulados y modificados (actualizados) según conveniencia del analista.

En la **tabla 1** se presentan las unidades de terreno, su superficie y las clases de pendiente, y uso del suelo dominantes. Este es el producto de agregar los resultados de la sobreposición del mapa de unidades de terreno (**figura 3**) y, respectivamente, el de uso del suelo (**figura 5**) y pendientes (**figura 6**).

Estos resultados permiten verificar la coherencia de las decisiones tomadas durante la fotointerpretación, caracterizar cuantitativamente la homogeneidad de las unidades de terreno en términos de sus pendientes y dominancia de clases de uso del suelo, y detectar errores de información. Al complementarse con datos litológicos y morfométricos como, por ejemplo, densidad y profundidad de disección fluvial, se introduce la posibilidad de un mapeo geomorfológico asistido por computadora.

La **tabla 2** y **figura 7** presentan la relación entre las unidades de terreno y la erosión en cárcavas. El área erosionada por cada unidad de terreno está expresada en valor absoluto, en hectáreas, como un porcentaje de cada unidad y como un porcentaje del área total erosionada. Las unidades más erosionadas son las denudatorias en rocas metamórficas, las colinas piroclásticas suavemente onduladas, las superficies cumbresales de los flujos ignimbríticos y los flujos andesíticos. Si se incluyen los piedemontes volcánicos, el 75% del total de los terrenos erosionados ocurre en estas unidades. Exceptuando las unidades en rocas metamórficas y las laderas de los flujos andesíticos, la mayor parte de la erosión en cárcavas se presenta en terrenos acumulativos casi planos o suavemente ondulados. Estas unidades volcánicas están caracterizadas por la existencia de horizontes compactados, relativamente someros, que impiden la percolación profunda del agua (Bocco, 1989b).

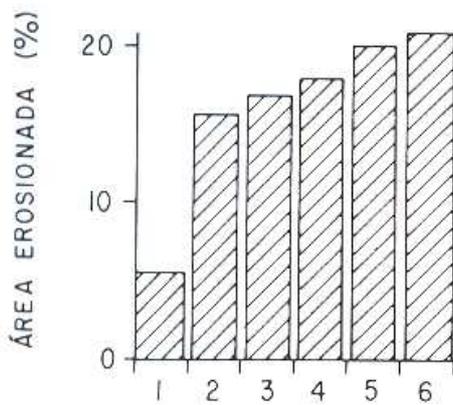
La relación entre pendiente y terrenos erosionados se presenta en la **tabla 3** y la **figura 8**. Casi el 70% de las zonas erosionadas ocurre en laderas con pendientes menores del 15% (8.-9.), una ruptura de pendiente crítica, entre unidades acumulativas y terrenos montañosos. Asimismo, el 50% de las zonas erosionadas se presenta en laderas con pendientes menores del 10% (6., véase **tabla 3**), un intervalo donde se encuentra la mayor parte de las superficies cumbresales de flujos lávicos así como las colinas piroclásticas (**tabla 1**). La moda (casi el 30% del total erosionado) ocurre en laderas de entre 5 y 10% (3. a 6.). En este intervalo de pendiente, el 18% del área total se encuentra erosionada. Este intervalo parece ser el crítico en cuanto al desarrollo de cárcavas en zonas volcánicas se refiere.

La inclinación de la pendiente es un factor relevante porque controla la hidrología de las vertientes y la acumulación de materiales superficiales susceptibles a los acarreamientos y a ciertos tipos de remoción en masa. La dominancia de terrenos erosionados en laderas relativamente suaves coincide con resultados obtenidos en el análisis de iniciación de cárcavas en zonas seleccionadas de la cuenca del río Tlalpujahua.

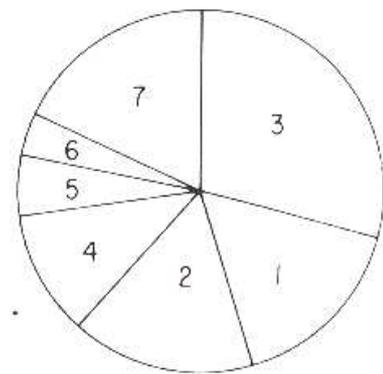
Tabla 2. Relación entre unidades de terreno y presencia de cárcavas (Tlalpujahua)

Unidades de terreno	Área (hectáreas)	Área erosionada		
		hectáreas	% UT	% total de erosión
1. Estratovolcanes	7 479	159	2.1	5.5
2. Volcanes complejos	2 480	65	2.6	2.2
3. Conos de escoria	341	21	6.1	0.7
4. Conos lávicos	859	20	2.4	0.7
5. Cumbres flujos andesíticos	2 042	171	8.4	5.9
6. Laderas flujos andesíticos	3 545	288	8.1	10.0
7. Cumbres flujos ignimbríticos	954	108	11.3	3.7
8. Escarpes ignimbríticos	52	0	0.0	0.0
9. Flujos ignimb. no dif.	188	17	8.9	0.6
10. Cumbres flujos riolíticos	303	14	4.5	0.5
11. Laderas flujos riolíticos	504	5	0.9	0.2
12. Cumbres flujos basálticos	2 320	117	5.0	4.0
13. Laderas flujos basálticos	1 130	50	4.4	1.7
14. Campos basálticos, c/tefra	4 077	133	3.3	4.6
15. Campos basálticos	586	31	5.3	1.1
16. Flujos lávicos, no dif.	712	22	3.2	0.8
17. Cumbres colinas piroclásticas	370	30	8.2	1.1
18. Laderas colinas piroclásticas	1 356	173	12.7	6.0
19. Piedemontes volcánicos	8 227	463	5.6	16.0
20. Valles erosivos en lavas	381	3	0.8	0.1
21. Laderas denudat. (metam.)	5 630	942	16.7	32.5
22. Piedemontes no volcánicos	1 827	43	2.3	1.5
23. Planicies fluviales	694	10	1.5	0.3
24. Planicies fluvio-lacustres	2 518	10	0.4	0.3
Presas	554	0	0.0	0.0
T o t a l	49 129	2 895		100.0

UNIDADES DE TERRENO Y ZONAS EROSIONADAS



A. % de U.T.



B. % del área erosionada

- 1. Piedemontes volcánicos
- 2. Flujos andesíticos
- 3. Unidades en metamórficos

- 4. Flujos basálticos
- 5. Flujos ignimbríticos
- 6. Flujos piroclásticos
- 7. Otros

Figura 7. Relación entre unidades de terreno y presencia de cárcavas.

Tabla 3. Relación entre clases de pendiente y presencia de cárcavas (Tlalpujahua)

Pendiente (en %)	Área		Área erosionada			
	(hectáreas)	%	(has)	% clase	% tot. er.	% acumul.
0-2	6 339	13.1	218	3.4	7.6	7.6
3-4	6 610	13.7	339	5.1	11.8	19.4
5-6	6 379	13.2	359	5.6	12.4	31.8
7-8	4 713	9.8	276	5.9	9.5	41.3
9-10	3 149	6.5	203	6.4	7.0	48.3
11-15	5 749	11.9	557	9.8	19.2	67.5
16-20	4 143	8.6	392	9.5	13.5	81.0
21-25	3 167	6.6	234	7.4	8.1	89.1
>25	8 062	16.6	317	3.9	10.9	100.0
		100.0	2 895			
Presas	554					
Urbano	262					

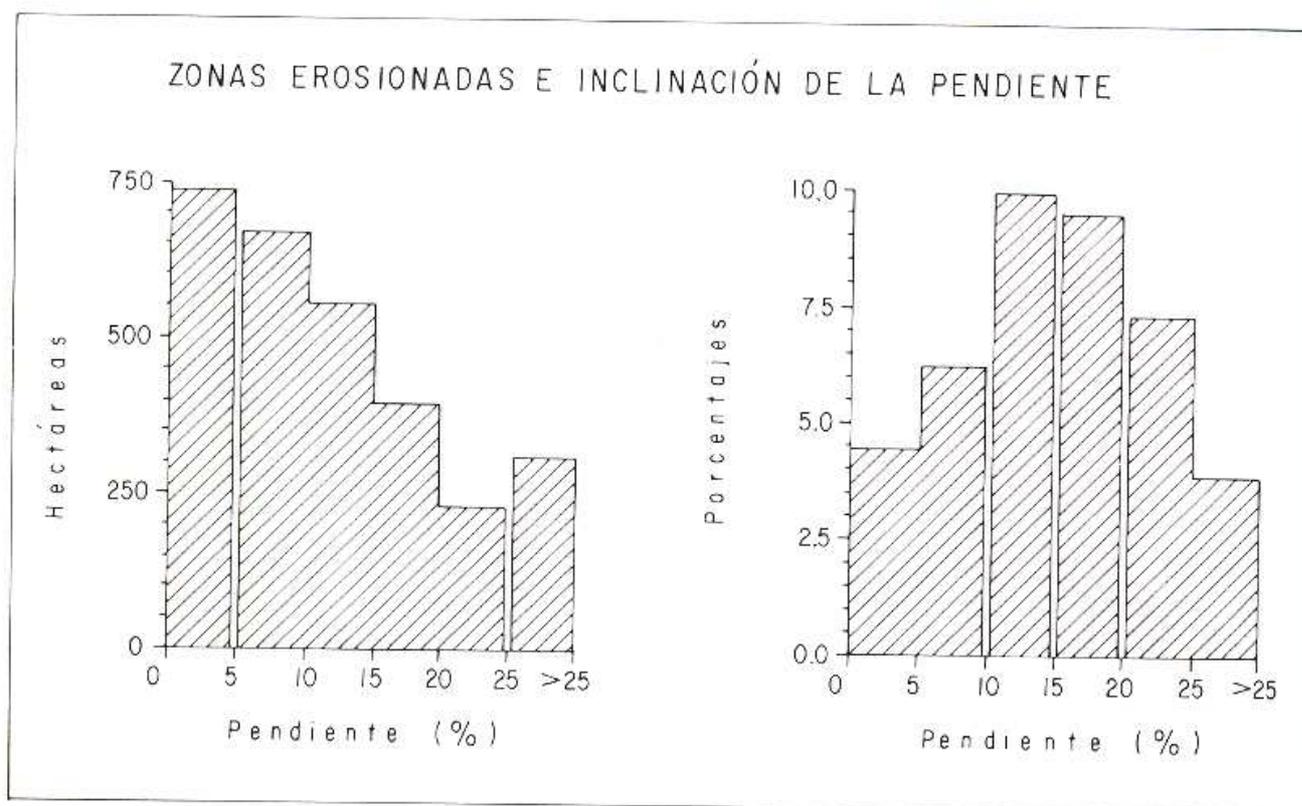


Figura 8. Relación entre inclinación de la pendiente y presencia de cárcavas.

La relación entre terrenos erosionados y uso del suelo (véanse tabla 4 y figura 9) indica que las zonas más erosionadas son aquéllas bajo agricultura de temporal y los pastizales; en conjunto representan 90% del área total erosionada. Casi el 7% de las zonas con el uso del suelo mencionado está erosionada. La erosión en cárcavas es baja en las zonas bajo agricultura de irrigación; este caso, sin embargo, requiere de especial atención, ya que las zonas irrigadas, con pendientes casi nulas, representan los mejores terrenos agrícolas.

Tabla 4. Relación entre uso del suelo y presencia de cárcavas (Tlalpujahua)

Uso del suelo	Á r e a		Área erosionada		
	hectáreas	%	hectáreas	% clase	% total
1. Agricultura irrigación	5 954	12.1	111	1.9	3.8
2. Agricultura temporal	24 490	49.9	2 084	8.5	72.0
3. Bosque abierto	7 122	14.5	163	2.3	5.6
4. Bosque	4 283	8.7	30	0.7	1.0
5. Pastizal	6 464	13.2	507	7.8	17.5
6. Presas	554	1.1			
7. Urbano	262	0.5			
Total	49 129	100.0	2 895		100.0

Los resultados para las zonas de temporal son los esperados, ya que el cultivo principal es el maíz, que ofrece una cobertura relativamente pobre. Otros factores, como tipos de prácticas agrícolas, también juegan un papel importante en la explicación de la relación entre desarrollo de cárcavas y agricultura en la zona de trabajo. Las observaciones de campo indican que el abandono de terrenos debido a la migración hacia zonas urbanas (la ciudad de México se encuentra a dos horas, en transporte público) ha favorecido el desarrollo de erosión. Este hecho pone de manifiesto la relevancia de factores socio-económicos en los problemas de erosión en el centro de México.

Las zonas en pastizal, sin embargo, deberían proporcionar una buena cobertura contra la erosividad de la lluvia. Las zonas erosionadas en terrenos originalmente cubiertos de pastos puede explicarse por la dominancia de procesos hidrológicos y erosivos subsuperficiales, incluyendo la remoción en masa. La **tabla 5** indica que el 75% de la erosión en terrenos originalmente bajo pasto, ocurre en laderas con inclinaciones menores que el 20% (11.). La mayor parte del 25% restante (es decir, en pendientes mayores que el 11.) ocurre en laderas denudatorias en rocas metamórficas.

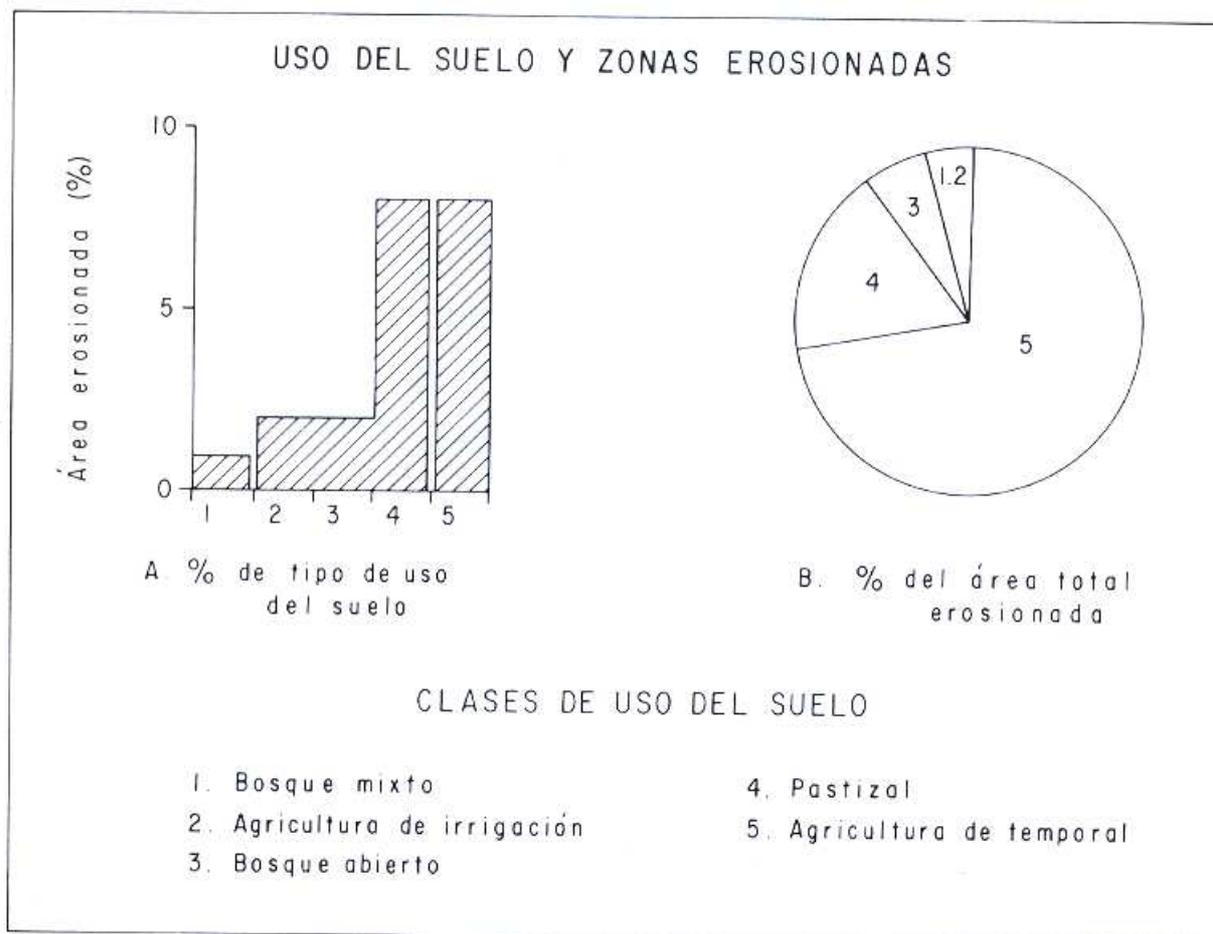


Figura 9. Relación entre uso del suelo y presencia de cárcavas.

Tabla 5. Erosión en cárcavas en pastizal, por rango de pendiente (Tlalpujahua)

Pendiente (en %)	(has)	Área Erosionada	
		%	% Acumulativo
0-2	7	1.4	1.4
3-4	29	5.7	7.1
5-6	59	11.7	18.8
7-8	50	10.0	28.8
9-10	42	8.4	37.2
11-15	117	23.0	60.2
16-20	76	15.1	75.3
21-25	40	7.9	83.2
>25	85	16.8	100.0
T o t a l	505	100.0	

Este análisis contribuyó a la comprensión de un patrón particular en relación con el uso del suelo y la erosión en unidades denudatorias en metamórficos y en laderas de flujos andesíticos, en áreas cercanas a antiguos distritos mineros (Tlalpujahuá, Dos Estrellas, El Oro). En estos casos, las cárcavas se presentan en laderas relativamente más inclinadas que en el resto de la cuenca del río Tlalpujahuá. Estas laderas han sido deforestadas para surtir madera a la explotación minera desde la época colonial; esta explotación, probablemente, ha desencadenado procesos acelerados de erosión en cárcavas, en terrenos originalmente bajo bosque mixto. La regolita exhumada (esquistos y pizarras alterados) es altamente erosionable y han sido disecados por cárcavas mayores a 5 m de profundidad.

Este patrón de desarrollo erosivo es diferente de aquéllos dominantes en terrenos volcánicos, donde la regolita (los llamados "tepetates") opera como niveles de base hidrológicos y de erosión (Bocco, 1989b). En el caso de los flujos andesíticos, a pesar que las pendientes dominantes son superiores a 25% (14.), el 83% de los terrenos erosionados se encuentran en laderas con pendientes menores a 15% (8.-9.), y casi el 50% en pendientes entre 5 y 10% (3.-6.) (tabla 6).

Tabla 6. Erosión en cárcavas en flujos andesíticos (Tlalpujahuá)

Pendiente (en) %	(has)	Área Erosionada	
		%	% Acumulativo
0-2	2	1.2	1.2
3-4	14	8.2	9.4
5-6	40	23.2	32.6
7-8	24	13.9	46.5
9-10	17	9.9	56.4
11-15	46	27.0	83.4
16-20	18	10.4	93.8
21-25	5	3.1	96.9
>25	5	3.1	100.0
T o t a l	171	100.0	

Formulación del modelo espacial

El análisis detallado del proceso de iniciación de los acarcavamientos en dos sitios, sugiere que el desarrollo de estos fenómenos en terrenos volcánicos cuaternarios, en climas estacionales, podría explicarse por la actividad de flujos hidrológicos subsuperficiales, operando sobre capas impermeables, en laderas acumulativas, suavemente onduladas (Bocco, 1990).

Estas conclusiones permiten una interpretación detallada de los resultados obtenidos por medio del sistema de información geográfica. En otras palabras, el grado de incertidumbre en las relaciones establecidas (y discutidas más arriba, en este artículo), se reduce en forma sustancial. Por tanto, es posible practicar eficientemente una extrapolación de aquellos resultados al conjunto de la cuenca y predecir las áreas

bajo riesgo severo de desarrollo de acarcavamientos. La extrapolación presupone un patrón climático uniforme así como condiciones relativamente homogéneas de materiales superficiales e hidrología de vertientes por unidad de terreno.

El desarrollo de la erosión en cárcavas puede ser explicado por el uso del suelo, los materiales superficiales y la hidrología de vertientes; todos estos factores están controlados, parcialmente, por la inclinación de la pendiente y se tuvieron en consideración en el diseño de las unidades de terreno.

Un modelo espacial (figura 10) basado en la frecuencia de ocurrencia de erosión en cárcavas, y describiendo las condiciones críticas para la iniciación del proceso, puede formularse sobre la base de las siguientes reglas.

“si el clima es estacional y las formas del relieve son volcánicas cuaternarias, y existen capas impermeables relativamente someras, y la inclinación de la pendiente es mayor del 2% y menor del 15%, y el uso del suelo es agricultura de temporal o pastizal, entonces, determinar (predecir) los terrenos bajo riesgo de erosión en cárcavas”.

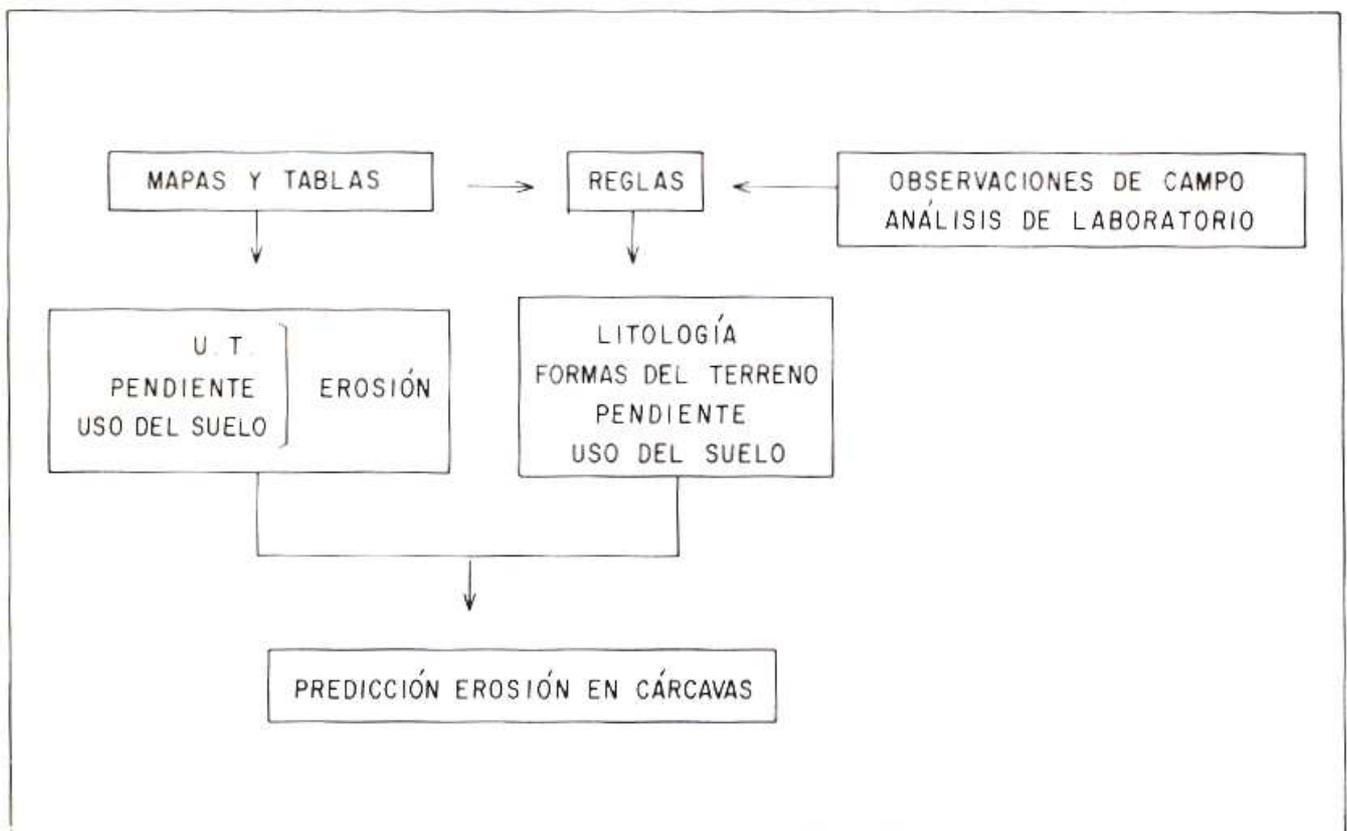


Figura 10. Diagrama del modelo espacial.

Este modelo fue aplicado utilizando el SIG; el modelo predijo el 75% del área total con erosión en cárcavas (es decir, 1 864 de las casi 2 500 ha erosionadas satisficieron las condiciones establecidas más arriba). Las zonas erosionadas predichas por el modelo se localizan en unidades de terreno que abarcan un área total de 103 km² (figura 11). Estas zonas pueden considerarse bajo el mayor riesgo y deben recibir prioridad en los planes de conservación del suelo.

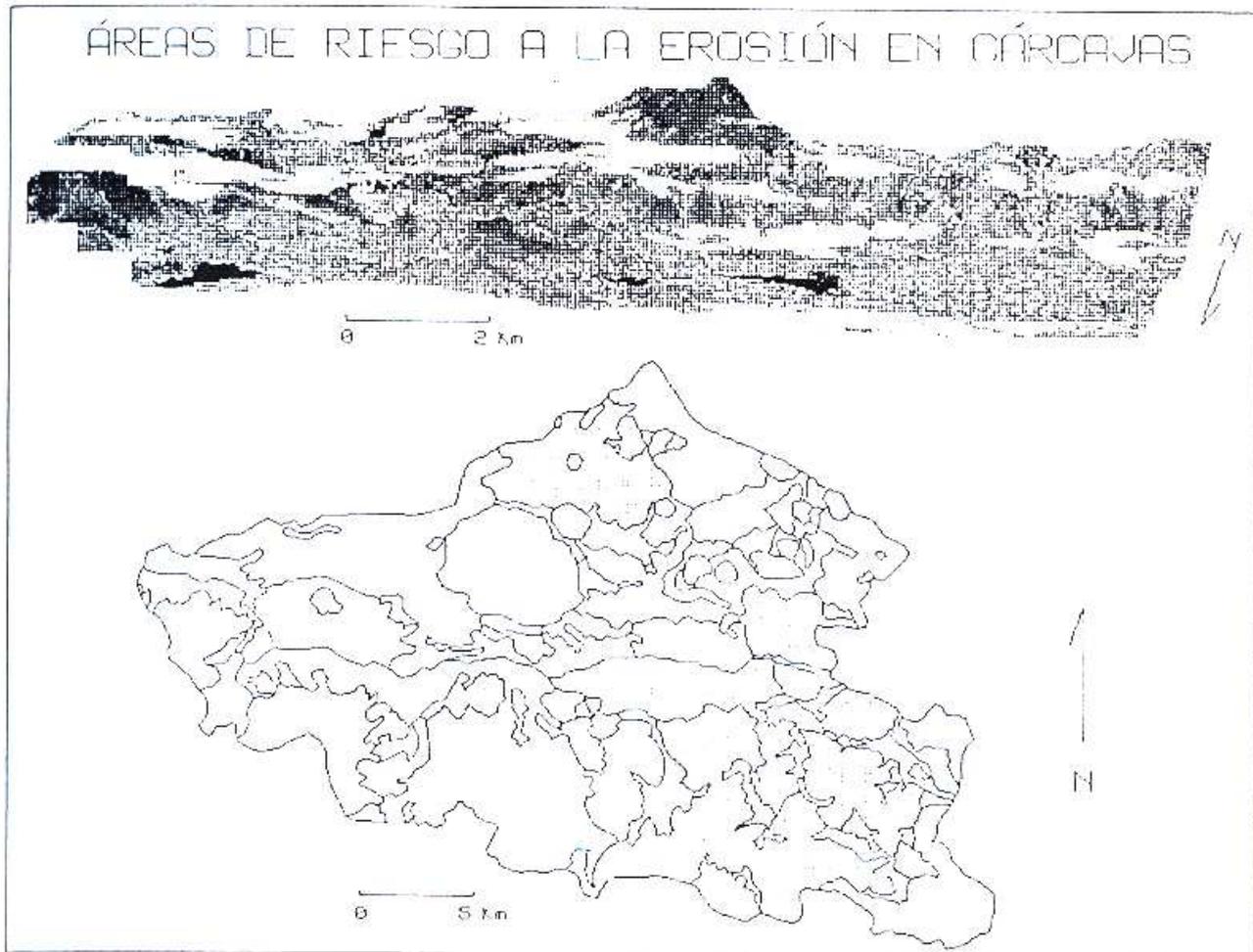


Figura 11. Áreas bajo severo riesgo de erosión en cárcavas.

Verificación de resultados

Los resultados obtenidos con el modelo descrito fueron verificados en Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo, México (figura 1), localizado en la misma provincia fisiográfica que la cuenca del río Tlalpujahuá. El uso del suelo, las unidades de terreno y las cárcavas fueron mapeados utilizando fotografías aéreas pancromáticas en blanco

Tabla 7. Unidades de terreno, pendientes y uso del suelo dominantes (Huasca)

Unidades de terreno	Área		Pendiente Dominante (en %)	Uso del suelo Dominante
	hectáreas	%		
1. Conos lávicos	216	0.7	21-30	Bosque mixto
2. Conos de escoria	170	0.6	21-30	Bosque mixto
3. Cumbres flujos basálticos	11 134	36.5	3-4	Agric. temp.
4. Laderas flujos basálticos	421	1.4	4-5	Pastizal
5. Laderas flujos riolíticos	4 152	13.6	21-30	Bosque abierto
6. Laderas flujos traquíticos	1 901	6.2	11-15	Bosque mixto
7. Laderas de lahares	984	3.2	11-15	Bosque mixto
8. Valles erosivos	5 702	18.7	> 50	Arbustos
9. Piedemontes volcánicos	4 151	13.6	3-4	Agric. temp.
10. Laderas denudatorias	693	2.3	11-15	Arbustos
11. Planicies fluviales	817	2.7	0-2	Agric. irrig.
Presas	162	0.5		
	30 506	100.0		

Tabla 8. Relación entre UT y presencia de cárcavas (Huasca)

Unidades de terreno	Área Erosionada		
	hectáreas	%UT	% total
1. Conos lávicos	0	0.0	0.0
2. Conos de escoria	26	15.1	1.7
3. Cumbres flujos basálticos	613	5.5	40.1
4. Laderas flujos basálticos	43	10.3	2.8
5. Laderas flujos riolíticos	3	0.1	0.2
6. Laderas flujos traquíticos	53	2.8	3.5
7. Laderas de lahares	111	11.3	7.3
8. Valles erosivos	29	1.1	1.9
9. Piedemonte volcánico	636	15.3	41.6
10. Laderas denudatorias	10	1.5	0.7
11. Planicies aluviales	2	0.7	0.1
Total	1 526		100.0

Tabla 9. Relación entre pendientes y presencia de cárcavas (Huasca)

Pendiente (en %)	Área			Área Erosionada			
	has	%	% acumulado	has	% clase	% total	% acumulado
0-2	4 157	13.6	13.6	131	3.2	8.6	8.6
3-4	5 150	16.8	30.4	296	5.6	19.4	28.0
5-6	4 359	14.2	44.6	411	9.4	26.9	54.9
7-8	2 359	7.7	52.3	271	11.5	17.7	72.6
9-10	1 625	5.3	57.6	127	7.8	8.3	80.9
11-15	3 700	12.1	69.7	162	4.4	10.6	91.5
16-20	2 534	8.2	77.9	62	2.4	4.1	95.6
21-30	2 690	8.8	86.7	46	1.7	3.0	98.6
31-50	1 875	6.1	92.8	13	0.7	0.9	99.5
>50	2 208	7.2	100.0	8	0.4	0.5	100.0

Tabla 10. Relación entre uso del suelo y presencia de cárcavas (Huasca)

Uso del suelo	Área		Área Erosionada		
	has	%	has	% clase	% total
1. Agricult. irrigación	2 292	7.5	40	1.7	2.6
2. Agricultura temporal	7 305	23.9	384	5.1	25.2
3. Bosque mixto	7 671	25.1	97	1.3	6.4
4. Bosque abierto	558	1.8	1	0.2	0.1
5. Pastizal	2 506	8.2	153	5.7	10.0
6. Pastizal/agricultura	3 025	9.9	748	24.1	49.0
7. Pastizal/suelo desnudo	419	1.4	42	10.0	2.7
8. Arbustos	6 631	21.7	61	0.9	4.0
9. Presas	153	0.5			
Total	30 559	100.0	1 526		100.0

y negro a escala 1:25 000 y transferidas sobre una base topográfica a escala 1:50 000 mediante un pantógrafo óptico. El mapa de pendientes fue construido utilizando el mismo procedimiento que en el caso anterior. (Mayor información sobre este estudio puede encontrarse en Palacio, 1989.)

Las unidades de terreno y sus principales características se presentan en la **tabla 7**. La **tabla 8** expresa la relación entre las UT y la erosión en cárcavas. Las unidades más erosionadas son los piedemontes volcánicos y los flujos basálticos, ambas suavemente onduladas. El caso de los conos de escoria representa menos del 2% del total erosionado.

Las relaciones entre terrenos erosionados, pendientes y uso del suelo se presentan, respectivamente, en las **tablas 9 y 10**. Las áreas de cárcavas en pendientes mayores que 15% (8. a 9.) representan menos del 10% de la zona total erosionada (**figura 12**); casi el 40% del área total con pendientes por debajo del 10% (6.) está erosionada (**tabla 9**). Casi 85% del área total erosionada se encuentra en agricultura de temporal y/o pastizales (**tabla 10**). La mayor parte de los terrenos en esos usos del suelo se localiza en pendientes menores que 6% (3.).

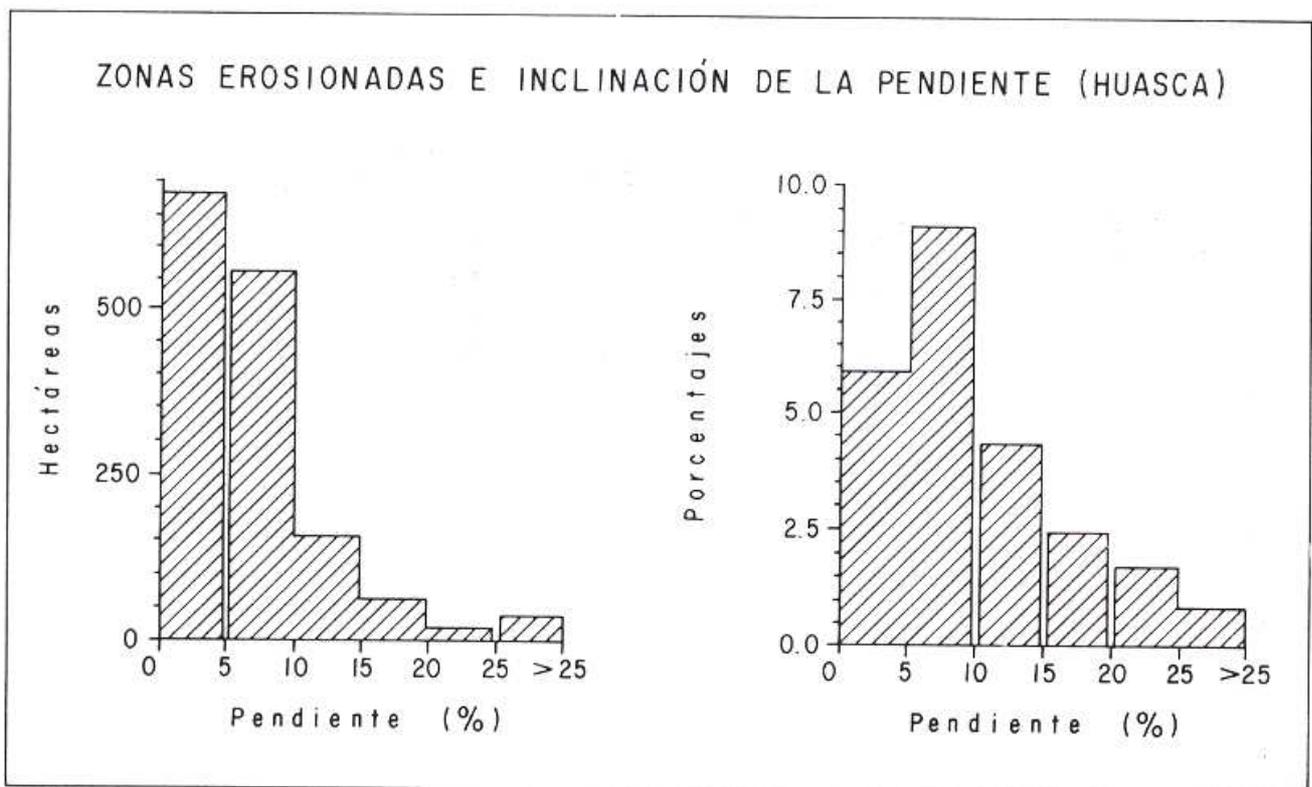


Figura 12. Relación entre inclinación de la pendiente y presencia de cárcavas (Huasca de Ocampo).

Los resultados coinciden con los obtenidos para la cuenca del río Tlalpujahua. El intervalo de pendiente crítico para el desarrollo de los acarcavamientos (3. a 6.), ya discutido en el caso anterior, es especialmente relevante. Por un lado, porque enfatiza la importancia de los procesos subsuperficiales hidrológicos y de erosión en la iniciación de las cárcavas. por el otro, ya que el modelo digital de elevación como el mapa de pendientes que de él se deriva son documentos cuantitativos que eliminan cualquier posibilidad de sesgo en la interpretación, tal como puede ocurrir en el caso de las unidades de terreno.

El modelo formulado para Tlalpujahua fue aplicado al municipio de Huasca. Las zonas erosionadas bajo agricultura de temporal y/o pastizales, con pendientes menores del 15% (8. a 9.) representan el 75% del área total erosionada (1 152 de 1 526 ha), lo cual coincide con los resultados obtenidos en la otra zona. Casi el 90% del área erosionada, explicada mediante este modelo, se localiza en superficies cumbreles de flujos basálticos (44%) y en piedemontes volcánicos (43%), ambas unidades acumulativas y ligeramente onduladas (tabla 9). El 25% de las áreas erosionadas no explicado por este modelo, se localiza en zonas originalmente bajo bosque y en laderas bajo agricultura de temporal, con pendientes mayores al 15%.

Conclusiones

Es posible formular modelos espaciales sencillos (aunque incluyendo una cantidad sustancial de conocimiento sobre la variabilidad del terreno), basados en la ocurrencia de terrenos erosionados y fundamentar su explicación mediante variables del paisaje (unidades de terreno, pendientes, uso del suelo).

Estas variables se interpretan utilizando percepción remota (respaldada por verificación de campo), formalizarse en mapas y tablas, y analizarse convenientemente usando técnicas de sistemas de información geográfica.

En este enfoque de modelamiento de dinámica de cárcavas se han combinado diferentes escalas de análisis y diferentes técnicas –desde procesamiento de imágenes de satélite hasta la verificación de materiales superficiales– para predecir áreas susceptibles al desarrollo de cárcavas y contribuir a la planeación de la conservación del suelo y agua.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el ITC (Países Bajos) y el Instituto de Geografía (UNAM). Con algunos cambios, este trabajo será publicado en inglés por el *ITC Journal* (edición especial dedicada a aplicaciones del ILWIS).

Referencias

- occo, G., "Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada", *Boletín*, núm. 19, Instituto de Geografía, UNAM, México, 1989a, págs. 39-54.

- Bocco, G., "El inventario de erosión antrópica: acarreamientos en la cuenca del río Tlalpujahua, México", *Boletín*, núm. 19, Instituto de Geografía, UNAM, México 1989b, págs. 55-68.
- Bocco, G., *Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems* tesis doctoral, (no publicada), ITC/Universidad de Amsterdam, 1990.
- Burrough, P. A., *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*, Clarendon Press, Oxford, 1986.
- Gorte, B., R. Liem y J. Wind, "The Ilwis Software Kernel", *ITC Journal*, 1988-1, págs. 15-2.
- Meijerink, A. M., "Data Acquisition and Data Capture Through Terrain Mapping Units" *ITC Journal*, 1988-1, págs. 23-44.
- Palacio, J. L., *Evaluating Gully Erosion Using ILWIS; an Example in Central Mexico*, ITC Internal Report, Enschede, 1989.
- Valenzuela, C. R., "Ilwis Overview", *ITC Journal*, (1), 1988, págs. 3-14.
- Verstappen, H. T., "Satellite Remote Sensing, Geomorphological Survey and Natural Hazard Zoning. Some New Developments at ITC, The Netherlands", *Suppl. Geograph. Fis. Dinam. Quat.*, 2, 1989, págs. 103-109.
- Walsh, S. J., D. R. Lightfoot y D. R. Butler, "Recognition and Assessment of Error in Geographic Information Systems", *Photogr. Eng. and R. S.*, 53(10), 1987, págs. 1423-1430.