

EL INVENTARIO DE EROSIÓN ANTRÓPICA: ACARCAVAMIENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO TLALPUJAHUA, MÉXICO

Gerardo Bocco*

RESUMEN

En este trabajo se presenta un inventario de la erosión antrópica en la cuenca del río Tlalpujahua, con base en un enfoque geomorfológico. Un 16% de los terrenos metamórficos y un 4.5% de los volcánicos están severamente erosionados. En total, un 5% de la cuenca está seriamente degradada. La mayor parte de la erosión ocurre en zonas acumulativas, en terrenos ondulados, con pendientes de suaves a moderadas y suelos arcillosos moderadamente profundos a profundos. El principal factor de diferenciación de los patrones erosivos en las zonas volcánicas y las no volcánicas es la hidrología de las vertientes (flujos superficiales en el metamórfico vs flujos subsuperficiales en el volcánico).

SUMMARY

An inventory of the anthropic erosion in the Tlalpujahua river basin, based upon an applied geomorphological approach, is presented. 16% of the metamorphic terrain and 4.5% of the volcanic terrain are severely eroded. As a whole, 5% of the catchment is badly affected. Most of the erosion processes occurs in areas of accumulation, in undulating terrains, gently sloping to sloping, with moderately deep to deep clayey soils. The main differentiating factor among the erosion patterns in the volcanic and non volcanic terrains is the slope hydrology (superficial flows in the metamorphics vs subsuperficial flows in the volcanics).

1. INTRODUCCION

Los problemas de erosión acelerada por la actividad humana, también denominada erosión de suelos o erosión antrópica (Toy, 1982), requieren de una evaluación y cuantificación que permitan planificar las medidas de conservación. La geomorfología aplicada proporciona un enfoque integral a estos efectos: permite elaborar una cartografía que sirve como contexto para analizar la distribución espacial de los rasgos de erosión (Verstappen, 1983).

Los objetivos del presente trabajo son:

a) Presentar al mapa de inventario de erosión como un documento sintético que permite cuantificar la erosión acelerada y analizar su distribución espacial.

* Becario. Instituto de Geografía, UNAM.

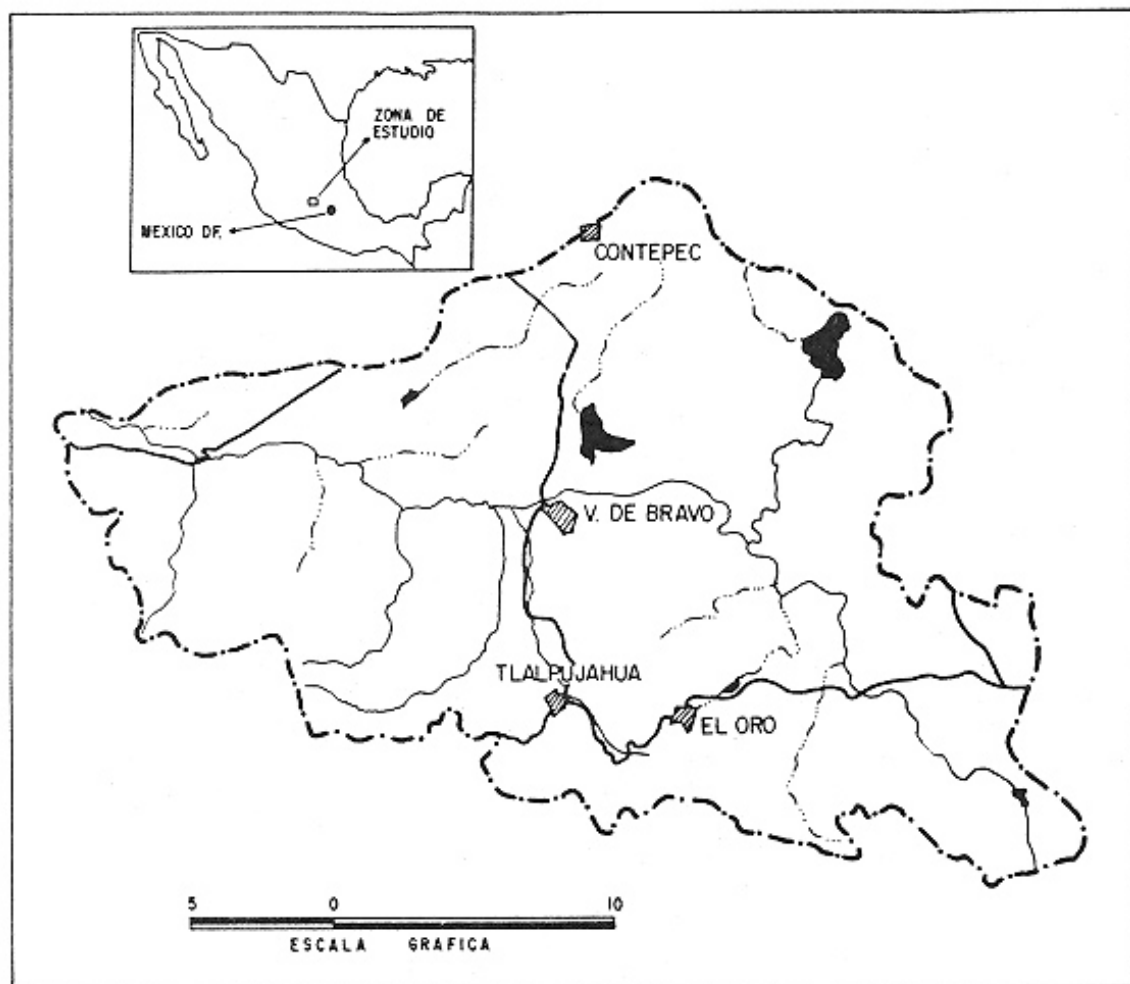


Fig. 1. Localización de la zona en estudio

b) Analizar los factores ambientales que controlan la erosión (litología y materiales superficiales, hidrología de las vertientes y cobertura del terreno).

c) Con base en el análisis anterior, realizar un estudio en detalle en zonas representativas y comparar patrones de acarcavamiento en terrenos volcánicos y metamórficos.

La delineación de las unidades de mapeo, así como la de los acarcavamientos, se realizó mediante fotointerpretación geomorfológica, utilizando fotos aéreas, pancromáticas, blanco y negro, a 1:50 000. El enfoque utilizado es el propuesto por Verstappen (1983) y Zuidam van y van Zuidam C., (1979).

La información obtenida fue volcada de las fotos al mapa topográfico (DGG, 1976) mediante un pantógrafo óptico. Las áreas fueron cuantificadas utilizando el programa AREA (Donker, s/f) a nivel microcomputador.

El presente inventario se realiza en la cuenca del río Tlalpujahuá (fig. 1), localizada en la porción occidental del Sistema Volcánico Transversal. La zona de estudio tiene un área de 490 km². Presenta suficiente variabilidad de materiales volcánicos así como un cuerpo metamórfico. La actividad neotectónica es intensa.

2. Diseño de la leyenda del mapa inventario de erosión.

El mapa inventario es un ejemplo típico de cartografía geomorfológica aplicada, en este caso, al problema de degradación. Se parte de una carta morfogenética que permite una reconstrucción geomorfológica del paisaje. Esta es considerada un importante punto de partida para posteriores levantamientos pragmáticos (Verstappen, 1983). Luego, las unidades se reagrupan en una leyenda más sencilla (cuadro 1; ver leyenda morfogenética y la metodología para su reagrupamiento en Bocco, 1989). El diseño tiene en cuenta materiales, morfografía y morfometría. La morfogénesis pasa a un segundo plano y, de hecho, se incluye a nivel de materiales. Los rangos de pendiente, amplitud de relieve y profundidad de los suelos se tomaron de Zuidam van y van Zuidam C. (1979:7).

3. Resultados del inventario de erosión.

El cuadro 2 sintetiza los resultados del levantamiento. Con excepción de las superficies cumbrales metamórficas, donde existe intensa erosión no concentrada (resultado del efecto de salpicamiento o "splash" y de la escorrentía difusa, y de la erosión en surcos o "rills") el resto de la erosión detectada a la escala de trabajo consiste en acarcavamientos (o barrancas, erosión concentrada). Teniendo en cuenta que las fotografías son a una escala aproximada de 1:50 000 (relativamente pequeña para este tipo de estudios), puede concluirse que los rasgos erosivos resultan de procesos muy severos. De otra manera no podrían detectarse a esta escala, donde 1 mm equivale a 50 m en la realidad. Este hecho fue verificado en campo.

3.1 Distribución espacial de la erosión.

Las unidades metamórficas ocupan 56 km² (11%) de la cuenca. De ellos, 863 ha (16% de los 56 km²) están severamente afectadas por procesos erosivos. Las unidades volcánicas (incluso los piedemontes volcánicos) ocupan 370 km² de la cuenca. De ellos, 1635 ha (4.5% de 370) están severamente afectados por erosión. En conjunto, 5% de la cuenca está severamente erosionado.

UNIDAD DE MAPEO DEL INVENTARIO	CODIGO MORFOG.	CLASIFICACION PENDIENTE/RELIEVE
1.0 Estratovolcanes	1.0	Mod. fuerte a fuerte/colina a montaña
2.1 Conos lávicos	2.1	Mod. fuerte/lomerío/colina
2.2 Conos escoriáceos	2.2	Mod. fuerte/lomerío colina
3.1 Superficies cumbresales andesíticas antiguas	3.1.1	Suave/ondulado
	3.2.1	Suave/ondulado
3.2 Superficie cumbresales ignimbríticas		
3.3 Superficie cumbresales andesíticas y basálticas recientes	3.3.1/5.1	Suave a moderada/ondulado
4.1 Laderas de 3.1	3.1.2	Fuerte/lomerío a colina
4.2 Laderas de 3.2	3.2.2	Fuerte/colina
4.3 Laderas de 3.3	3.3.2/5.2	Fuerte/colina
5.1 Campos basálticos	3.4.2	Moderada/ondulado a lomerío
5.2 Idem. c/cob. tefra	3.4.1	Suave/ondulado
6.1 Superficies cumbresales metamórficas	7.1/8.1	Suave/ondulado
6.2 Laderas denudatorias metamórficas	4.0/7.2/8.2	Mod. fuerte a fuerte/lomerío a colina
6.3 Piedemontes metamórficos	8.3	Moderada/ondulado a lomerío
7.1 Lomeríos piroclásticos	6.1	Moderada/ondulado a lomerío
7.2 Piedemontes coluviales volcánicos	9.1	Moderada/ondulado a lomerío
7.3 Piedemontes acumulativos	6.2/9.2	Moderada/ondulado a lomerío
8.0 Planicies acumulativas	10.1/10.2/10.3	Plano o casi plano

Cuadro 1. Leyenda del mapa de inventario, con códigos de las correspondientes unidades morfogénéticas y los rangos pendiente/relieve (ver Bocco, 1988)

UNIDAD DE MAPEO	AREA KM ²	% TOT.	EROSION HAS. %	MATERIAL SUPERFICIAL		ESCURRIMIENTO EROSIVO DOMINANTE	CAPA CONTROL INFILTRACION	COBERTURA
				Andesitas alteradas, tefra	Lavas alteradas			
1.0 Estratovolcanes	74	15	49	0.7	Andesitas alteradas, tefra	Ausente	Lavas alteradas	Bosque
2.1 Conos lávicos	10	2	3	0.3	Lavas alteradas	Ausente	Lavas alteradas	Bosque/arbusto
2.2 Conos escoriáceos	10	2	23	2.3	Tefra retrabajada	Subsuperficial	Silcretas	Arbustos
3.1 Sup. cumb. and. antig.	22	5	143	6.4	Suelos arcillosos profundos	Subsuperficial	Bt/lavas alteradas	Temporal
3.2 Sup. cumb. ignimbriticas	11	2	70	6.3	Suelos arcill. mod. profundos	Subsuperficial	Ignimbritas alter.	Temporal/pasto
3.3 Sup. cumb. bas/and.	32	7	132	4.2	Tefra alterada & suelos arcill.	Subsuperficial	Lavas, silcretas	Temporal
4.1 Laderas de 3.1	30	6	76	2.5	Suelos arcill. mod. profundos	Subsuperficial	Silcretas	Temporal
4.2 Laderas de 3.2	5	0	4	0.8	Suelos delgados	Ausente	Ignimbritas	Bosque
4.3 Laderas de 3.3	22	5	19	0.8	Suelos delgados	Ausente	Lavas	Bosque
5.1 Campos basálticos	21	4	23	1.1	Suelos delgados	Ausente	Lavas	Bosque/arbusto
5.2 Idem c/cob. tefra	57	12	264	4.7	Tefra retrabajada	Subsuperficial	Silcretas, basaltos	Temporal
6.1 Sup. cumb. metamórficas	7	1	38	5.9	Suelos arcillosos profundos	Superficial	Ausente	Temporal/bosque
6.2 Laderas denudat. met.	45	9	755	16.3	Suelos arcill. mod. profundos	Superficial	Ausente	Temporal
6.3 Piedemontes metamórficos	4	1	70	20.3	Metamórficos alterados	Superficial	Ausente	Temporal
7.1 Lomeríos piroclásticos	23	5	431	18.4	Suelos arcill. mod. profundos	Subsuperficial	Silcretas	Temporal/pasto
7.2 Piedemontes coluv. volc.	54	11	398	7.4	Tefra alterada	Subsuperficial	Silcretas	Temporal
7.3 Piedemontes acumulativos	24	5	0	0.0	Suelos arcill. mod. profundos	Ausente	Ausente	Temporal
8.0 Planicies acumulativas	34	7	20	0.6	Suelos arcillosos	Ausente	Ausente	Irrigación
Presas	5	1	0	0.0				
TOTAL	490	100	2518					

Cuadro 2. Síntesis del inventario de erosión. Las zonas erosionadas se cuantifican en valores absolutos (has) y como % de la unidad cartográfica correspondiente

Las unidades de mapeo pueden dividirse, de acuerdo con el porcentaje de sus áreas afectado por erosión, de la siguiente manera:

20 - 15%	6.3, 7.1 y 6.2	Muy afectadas
8 - 4%	7.2, 3.1 y 3.2, 6.1, 5.2 y 3.3	Afectadas
3 - 2%	2.2 y 4.1	Moderadamente afectadas
1 - 0%	Demás unidades	Poco afectadas

Nótese que las unidades más castigadas son:

a) Los piedemontes: pendientes moderadas (4 a 8 grados), con relieve de ondulado a lomerío (amplitud de relieve de 30 a 100 m).

b) Las superficies cumbrales y los campos basálticos con cobertura de tefras: pendientes suaves (2 a 4 grados), con relieve ondulado (amplitud de 20 a 50 m).

Sólo las laderas metamórficas (unidad 6.2) pertenece al grupo de pendiente moderadamente fuerte a fuerte (8 a 16 y 16 a 35 grados) y de relieve lomerío a colina (amplitud de 70 a 150 m).

Proporcionalmente, sin embargo, las unidades metamórficas son los piedemontes (unidad 6.3, de pendiente moderada).

Asimismo, sólo las laderas de los flujos andesíticos más antiguos (pleistoceno temprano) están severamente afectadas por erosión. El resto de las laderas de flujos volcánicos no están tan degradadas. Las planicies y los estratovolcanes, por su parte, no presentan un desarrollo importante de erosión.

Este agrupamiento representa, además, una medida indirecta de la susceptibilidad de la erosión en cárcavas de cada unidad de mapeo.

3.2 Factores ambientales que controlan la erosión.

3.2.1 Materiales. La mayor parte de la erosión ocurre en suelos arcillosos (vertisoles, luvisoles y acrisoles), moderadamente profundos (50-150 cm), tanto en el volcánico como en el metamórfico. En el primer caso deben agregarse tefras re-trabajadas fluvialmente y duripanes (conocidos localmente como tepetates).

3.2.2. Hidrología de laderas. Las características del escurrimiento son contrastantes en el volcánico y el metamórfico. En este último el escurrimiento superficial (del tipo del flujo Hortoniano, ver Dunne, 1978) es el dominante. Esto se debe a la presencia de un horizonte superficial impermeable. Por tanto, la respuesta hidrológica de las vertientes es muy rápida.

En las unidades volcánicas los horizontes superficiales son más permeables que los horizontes y capas subsuperficiales, especialmente que los duripanes; por tanto dominan los flujos subsuperficiales y la respuesta hidrológica de las vertientes es más lenta. En caso de precipitaciones de alta intensidad (> 25 mm/hora), el flujo superficial puede ser muy abundante (observaciones de campo).

3.2.3 Cobertura del terreno. Las coberturas dominantes de los terrenos afectados son la agricultura de temporal y los pastos. Esto es lógico, ya que las



Fig. 2. Estereotriplet. Unidades metamórficas

zonas más susceptibles son también las más aptas para agricultura (laderas suaves, suelos moderadamente profundos). En cuanto a los pastos, en tanto favorecen la infiltración, favorecen el escurrimiento antes mencionado.

Los puntos críticos ("bad spots", en la literatura anglosajona, ver Bergsma, 1983), aquellos donde se inicia la erosión, ocurren en: parcelas abandonadas, drenes y contradrenes de caminos principales y secundarios, senderos entre parcelas y desagües de parcelas.

A partir de estos puntos se generan verdaderas redes antrópicas de drenaje (lógicamente de primer orden), que se conectan con las redes naturales laderas abajo. De esta manera se produce erosión acelerada en posiciones de paisaje francamente acumulativas (superficies cumbrales, piedemontes acumulativos) desde el punto de vista de los procesos geológicos.

4. Fotointerpretación geomorfológica comparada de los patrones erosivos actuales en terrenos metamórficos y volcánicos.

Para poder realizar un análisis más detallado de los procesos erosivos acelerados, se interpretaron dos estereotriplets correspondientes a ambos tipos de paisaje. Se utilizaron fotos aéreas pancromáticas, blanco y negro (DGG, 1970); la escala aproximada es de 1:25 000. Las leyendas difieren de acuerdo con las características de cada ejemplo; las unidades geomorfológicas, sin embargo, son análogas de las utilizadas en la leyenda del inventario de erosión a escala de toda la cuenca. No se intenta mapear todos los detalles del modelo, simplemente ejemplificar las posibilidades que ofrece este tipo de interpretación.

4.1 Unidades de paisaje en rocas metamórficas.

En la figura 2 se presenta el estereomodelo correspondiente a las unidades metamórficas. Las leyendas geomorfológica y de uso del suelo/erosión se presentan en los cuadros 3 y 4.

No.	NOMBRE DE LA UNIDAD
1.	Superficies cumbrales (pendientes planas a suaves, 2-4 grados)
2.	Laderas denudatorias (pendientes moderadamente fuertes y fuertes, > 10 grados)
3.	Piedemontes acumulativos (pendientes moderadas, 7-10 grados)
4.	Planicies fluviales (planas o casi planas, < 2 grados)
5.	Flujo andesítico
6.	Mesa ignimbrítica

Cuadro 3. Leyenda geomorfológica de la fig. 2

4.1.1 Análisis. El sustrato litológico juega un papel determinante. Nótese la ausencia de rasgos erosivos en el flujo andesítico, con una cobertura muy delgada de piroclastos, debido a la resistencia de este material e independientemente de la presencia de vegetación y la influencia de la pendiente.

No.	NOMBRE DE LA UNIDAD
I.	Erosión en cárcava (> 10 m profundidad: -- >)
II.	Erosión laminar ("interrill")
	II.1 Activa (horizontes superficiales aún presentes)
	II.2 Muy activa (horizontes superficiales ausentes; regolita exhumada)
III.	Asociación de erosión laminar e incisión en cárcavas
IV.	Procesos erosivos de ausentes e incipientes

Cuadro 4. Leyenda de uso del suelo/erosión de la fig. 2

Las planicies, prácticamente, no están afectadas por procesos erosivos. Sin embargo, en el punto A (fig. 2) existen acarcavamientos debido a la actividad de flujos subsuperficiales (observación de campo). En este punto, cenizas volcánicas recientes están cubiertas por aluvión y coluvión metamórficos. La actividad hídrica subsuperficial se debe a las diferentes permeabilidades de las cenizas y de los materiales no volcánicos. En este caso la pendiente no puede correlacionarse en forma positiva con la erosión.

Las superficies cumbrales (unidad 1) están sujetas a erosión laminar muy activa (ver puntos B y C), pero no a la incisión. Sin embargo, debido a un rápido retroceso de la cabecera de las cárcavas, puede presentarse erosión vertical (incisión) en el borde de algunas superficies cumbrales (punto D). La erosión laminar se debe al efecto de salpicamiento y al flujo hidrológico de tipo hortoniano, que son una consecuencia de una intensa deforestación y de la presencia de horizontes superficiales arcillosos muy impermeables. Los tonos blancos en las fotos indican la exhumación de la regolita del metamórfico.

Casi todas las laderas (incluso las de piedemonte, unidades 2 y 3) están severamente afectadas por acarcavamientos profundos (> 10 m) y erosión laminar muy activa. Los acarcavamientos profundos resultan de la concentración del escurrimiento superficial. Las cárcavas presentan generalmente un patrón paralelo y un perfil transversal en forma de "V", con paredes muy empinadas (> 30 grados). Localmente, procesos de remoción en masa (deslizamientos) contribuyen al retroceso de las paredes. La incisión es muy rápida porque (1) no existe una cobertura protectora; (2) las alteritas retrabajadas del metamórfico son muy susceptibles a este proceso. Nótese que la incisión profunda (punto E) es muy activa en concavidades donde se acumulan materiales retrabajados con un espesor de más de 3 m. El desarrollo de la incisión está controlado por la presencia de la regolita, relativamente más resistente. En muchos lugares, sin embargo, la incisión puede cortar a esta capa (punto F).

Algunas laderas no están expuestas a la erosión acelerada (punto G y ladera arriba). Esto puede deberse a la longitud de la pendiente (< 100 m), en comparación con el punto F (> 750 m). La inclinación de las pendientes erosionadas varía entre los 10 y 15 grados (7 a 10 en los piedemontes), medidas en el campo.

Las áreas con cobertura de bosque presentan poca o nula erosión. La deforestación debió iniciarse junto con la explotación minera (siglo XVI), y debió alcanzar un pico durante el gran auge de principios del presente siglo.

Muchos contactos entre terrenos erosionados y no erosionados son linderos de parcelas (nótese el patrón rectilíneo en el punto H), debido a compactación por tránsito (pérdida de permeabilidad y concentración de escurrimiento) y desagüe de drenes. Sin embargo, en muchas parcelas la erosión se desencadena por abandono de la práctica agrícola (observaciones de campo).

Los caminos secundarios y brechas también son puntos de generación de cárcavas. Por un lado, al construirse, se crea un nuevo nivel de base para el escurrimiento (superficial y subsuperficial) (ver punto I). Por otro, el desarrollo de los acarcavamientos amenaza la estabilidad de estos caminos (punto J). Existe una retroalimentación positiva entre vías de comunicación secundarias y cárcavas.

4.1.2 Conclusiones. El desarrollo del acarcavamientos en las unidades metamórficas puede resumirse de la siguiente manera:

a. Concentración de escurrimiento laminar (especialmente debido a perturbaciones antrópicas); desarrollo de erosión laminar, en surcos, e inicio de acarcavamientos.

b. Incisión profunda de las cárcavas en los materiales retrabajados por procesos de ladera.

c. Retroceso de las paredes por remoción en masa. El desarrollo de surcos sobre las paredes conduce al desarrollo de nuevas generaciones de cárcavas.

d. Decece la incisión y se produce ensanchamiento debido al control litológico proporcionado por la regolita. En algunos casos el corte continúa afectando a la propia regolita.

No es posible relacionar en forma absoluta cierto tipo de erosión con una determinada unidad geomorfológica. Las formas del relieve juegan un papel indirecto al controlar los lugares donde el material susceptible de ser erosionado se acumula, y al controlar la hidrología de las vertientes.

4.2 Unidades volcánicas cuaternarias.

El estereomodelo correspondiente a las unidades volcánicas se presenta en la fig. 3. La leyenda geomorfológica/uso del suelo/erosión se presenta en el cuadro 5.

4.2.1 Análisis. Los conos de escoria, afloramientos de lava y las pendientes fuertes de los flujos lávicos están poco afectadas por fenómenos erosivos. Esto se debe al control litológico: alta permeabilidad de la escoria y alta resistencia de los basaltos. La erosión se presenta en cuanto existen materiales erosionables (tefra y suelos derivados). Esto ocurre en:

- superficies cumbrales de los flujos lávicos;
- pendientes moderadamente fuertes de flujos lávicos;
- campos basálticos con cobertura de tefra;
- piedemontes acumulativos volcánicos;
- planicies fluviales (materiales volcánicos retrabajados).

En todas estas unidades las pendientes son menores de 10 grados. Las conca-vidades son relevantes en las pendientes lávicas.

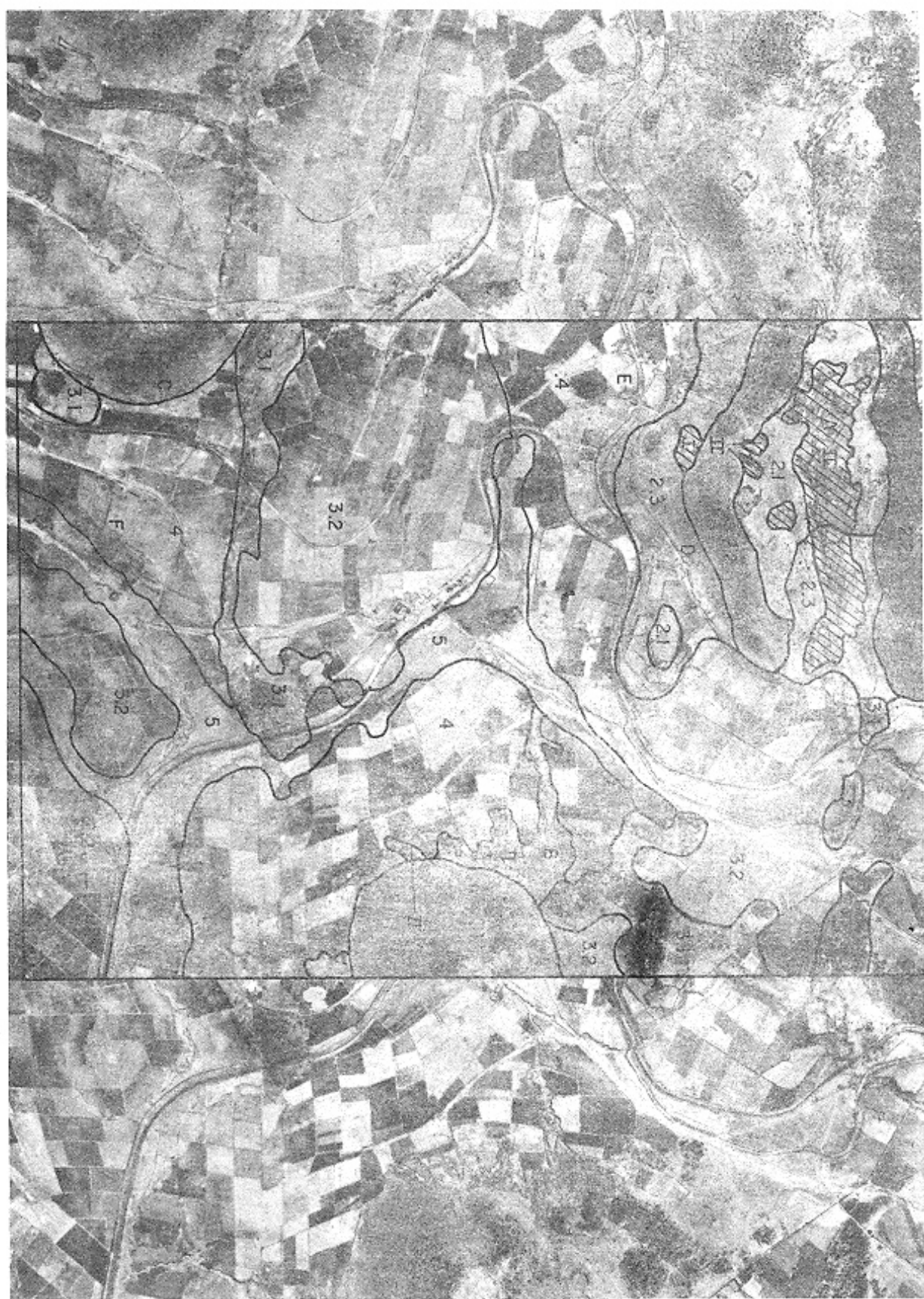


Fig. 3. Estereotriplet. Unidades volcánicas

No.	NOMBRE DE LA UNIDAD
1.	Conos de escoria (matorral, pastoreo)
2.	Fijos basálticos
2.1	Superficies cumbrales, cobertura tefra > 1 m (temporal)
2.2	Pendientes fuertes (> 20 grados) (bosque mixto)
2.3	Pendientes moderadamente fuertes, cobertura tefra < 1 m (agricultura de temporal, localmente pastoreo)
3.	Campos basálticos
3.1	Cobertura tefra < 1 m (matorral, pastoreo)
3.2	Cobertura tefra > 1 m (agricultura de temporal)
4.	Piedemontes acumulativos volcánicos (agricultura de temporal)
5.	Planicie fluvial (agricultura de irrigación)
I.	Acarcavamientos activos
II.	Acarcavamientos muy activos (profundidad > 2 m)

Cuadro 5. Leyenda geomorfología/erosión, unidades volcánicas

Nótese que, a diferencia del caso metamórfico, las cárcavas no son alimentadas por zonas de erosión laminar/surcos ("interrill/rill"). En otras palabras, la concentración del escurrimiento de tipo hortoniano tiene importancia secundaria como agente generador de cárcavas. La verificación de campo indica que el acarcavamiento empieza como resultado de asentamientos en el terreno debidos a la pérdida de cohesión de los suelos por la actividad de flujos subsuperficiales. Una vez iniciado el acarcavamiento, los flujos superficiales actúan generando surcos en las paredes de las cárcavas y se inicia dinámica de cauce. Los asentamientos y deslizamientos controlan el retroceso de cabecera y paredes, con fuerte influencia de aporte hídrico subsuperficial proveniente de porciones no perturbadas de la ladera. En caso de que la intensidad de la precipitación sea mayor que la capacidad de infiltración, el aporte del escurrimiento laminar también contribuye al retroceso de cabeceras.

La predominancia de flujos subsuperficiales se debe a la presencia de un horizonte superficial relativamente permeable, y un horizonte subsuperficial menos permeable o de muy baja permeabilidad (un B textural, un duripán -tepetate-). Estas capas operan como nivel de base para estos flujos y controlan los movimientos en masa. A veces su papel puede ser jugado por una superficie lávica o ignimbrítica.

Los tepetates pueden ser inferidos por fotointerpretación (ver tonos claros en A y B, fig. 3). Estos duripanes resultan del endurecimiento (solución y redeposición de silicatos) de cenizas volcánicas y basaltos y andesitas alteradas, tanto ínsitas como retrabajadas (fluvial o lacustre). Por tal motivo ocurren en diferentes posiciones geomorfológicas: superficies cumbrales, piedemontes o planicies.

A pesar del impacto del pastoreo en los conos de escoria (ver terracetas en C), la permeabilidad del material aún no ha sido afectada. Las pendientes fuertes de los flujos tampoco indican actividad erosiva fuerte: sus suelos relativamente poco profundos están protegidos por una cubierta de encino/pino. La influencia más

determinante del uso del suelo es el papel jugado por los caminos secundarios, canales de irrigación y linderos, ya mencionados para el metamórfico (ver puntos D y E). Esto es válido también para el patrón rectilíneo de algunas cárcavas (punto F).

4.2.2 Conclusiones. Una secuencia del desarrollo del acaravamiento en terrenos volcánicos puede sintetizarse de la siguiente manera:

a. Alta infiltración en laderas con pendientes moderadas. Dominancia de flujos subsuperficiales en laderas no perturbadas.

b. Perturbación de vertientes por asentamientos, impacto antrópico o los dos. Compactación, disminución de la conductividad hidráulica, corte de los flujos subsuperficiales. Inicio del acaravamiento.

c. Desarrollo de flujos hidrológicos superficiales dentro de las cárcavas: erosión por salpicamiento y surcos sobre las paredes; dinámica de cauce. Retroceso de paredes y cabecera por remoción en masa. Desarrollo de nuevas generaciones de tributarios.

d. Ensanchamiento al alcanzar la capa de control (duripán, lava, etc.). Remoción en masa, dinámica de cauce, desarrollo de tributarios.

Los acaravamientos son muy activos en piedemontes volcánicos de laderas moderadas y en superficies lávicas cubiertas de piroclastos, con pendientes suaves. El desarrollo de los tepetates se correlaciona con el desarrollo del acaravamiento.

Otra vez, los depósitos superficiales y la hidrología de las vertientes son factores esenciales en la explicación de los procesos erosivos.

5. Conclusiones.

- La mayor parte de la erosión ocurre en zonas acumulativas, con pendientes de suaves a moderadas (2 a 8 grados), y terrenos ondulados, con suelos arcillosos moderadamente profundos a profundos, tanto en los terrenos volcánicos como en los no volcánicos.

- El principal factor de diferenciación de los patrones erosivos en ambos tipos de paisaje es la hidrología de laderas. Los flujos superficiales, dominantes en el metamórfico, generan surcos que alimentan las cárcavas actuales que se transformarán, en el futuro, en nuevas cárcavas. Como contrapartida, en el volcánico, independientemente de la edad y la composición (ácida a básica) de los materiales, los flujos hidrológicos subsuperficiales son los agentes productores de erosión dominantes.

- En síntesis, cualquier estudio acerca de erosión hídrica debe analizar previamente la hidrología de las vertientes, ya que serán los patrones hidrológicos los que controlen la consiguiente erosión acelerada. Esto es muy importante a la hora de proponer medidas de conservación. Si dominan los flujos subsuperficiales, las medidas tendientes a promover la infiltración (que en general se recomiendan para proteger a los suelos de la erosión) pueden provocar efectos contrarios a los esperados, ya que se estimularía el flujo hidrológico erosivo dominante.

AGRADECIMIENTOS

El Instituto de Geografía (UNAM) proporcionó la infraestructura para el trabajo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bergsma, E. 1983. "Rainfall erosion surveys for conservation planning". ITC Journal 1983-2:166-174.
- Donker, N. s/f. AREA. Computer program for area calculations. Basic. PC level. ITC. Enschede.
- Dunne, T. 1978. "Field studies of hillslope processes". En Kirby, M. (ed.) Hillslope Hydrology. Wiley. Chichester: 227-294.
- Toy, T. 1982. "Accelerated erosion: processes, -problems and prognosis". Geology. 10:524-529.
- Verstappen, H.T. 1983. Applied Geomorphology. Elsevier. Amsterdam.
- Zuidam van, R. y F. van Zuidam C. 1979. Terrain Analysis and Classification using Aerial Photographs. ITC Text Book VII-6. ITC. Enschede.