

**MANEJO Y USO DEL AGUA EN LAS CUENCAS
HIDROGRAFICAS DEL NORTE DE MEXICO
CENID RASPA, ORSTOM**

Folleto Científico N° 7
INIFAP-ORSTOM

**ESCURRIMIENTO Y EROSION
EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL**

Luc DESCROIX
Jean François NOUVELOT

inifap
PRODUCE

CENID RASPA

ORSTOM

1997

El Pueblo del Mamote
fue el cura del Pueblo de Jarral
D. Manuel Saldaña con algunas familia-
as de otro Pueblo en 1732. De tempera-
mento es calientemente sensible goza de mu-
cha Agua de la q^a está sercado por su parte
Occidental tiene tierra: las Calamitas y el
maspher.
para d
Abitad
Es muy fértil para granos
y muy pobre

ISBN 968-6990-9-7

**MANEJO Y USO DEL AGUA EN LAS CUENCAS
HIDROGRAFICAS DEL NORTE DE MEXICO
CENID RASPA, ORSTOM**

*Folleto Científico N° 7
INIFAP-ORSTOM*

**ESCURRIMIENTO Y EROSION
EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL**

**Luc DESCROIX
Jean François NOUVELOT**

inifap
PRODUCE

CENID RASPA

ORSTOM

1997

ESCURRIMIENTO Y EROSION EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

**Luc DESCROIX
Jean François NOUVELOT**

(Investigadores de ORSTOM)

PROYECTO INIFAP - ORSTOM

**Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera**

Gómez Palacio, Durango. MEXICO

Noviembre 1997

FOLLETO CIENTIFICO N°7
(INIFAP-ORSTOM)
ISBN 968 - 6990 - 9 - 7
IMPRESO Y HECHO EN MEXICO
CENID-RASPA
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Dgo.
Apdo. Postal 41
35150 Cd. Lerdo, Durango, MEXICO
Tels. 01 (17) 19-10-76
Fax 19-11-34

COMITE EDITORIAL

Presidente:	Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Secretario:	Ing. Raquel Anguiano Gallegos
Vocales:	Dr. José Luis González Barrios
	M.C. Miguel Rivera González

CONTENIDO	Página
PRESENTACION	1
RESUMEN	2
RESUME	2
ABSTRACT	3
I. PRESENTACION DE LA REGION Y DE LA PROBLEMÁTICA	4
Las formas de erosión y de escurrimiento	6
II. METODOLOGIA	7
III. EROSION Y ESCURRIMIENTO	14
A- Condiciones generales	14
B- En zona de bosque	16
Erosión y escurrimientos	16
Variables explicativas de la erosión y el escurrimiento	17
Variables temporales: características de los eventos	18
Parcelas de 40 m ² . Escurrimiento	20
Erosión	20
Variables espaciales: características de las parcelas	21
C- En zona de sabana	23
Variables temporales	25
Escurrimiento	26
Erosión	26
Variables espaciales	27
IV. MODELACION DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LAS CUENCAS	30
Modelación correlativa	31
Modelación determinista	33
Resultados de la modelación	35
V. EVOLUCION ESTADISTICA DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL NAZAS	35
VI. IMPACTO DEL SOBREPASTOREO Y DEL DESMONTE	37
El sobrepastoreo y la evolución del medio	37
Causas del sobrepastoreo	38
Consecuencias del sobrepastoreo	38
La sobreexplotación forestal: mito o realidad	40
CONCLUSION	43
BIBLIOGRAFIA	44
ANEXOS	46

INDICE DE FIGURAS

Página

1. La Región Hidrológica 36 y el área de estudio	5
2. Etapas de evolución del ecosistema como consecuencia del uso actual del suelo	8
3. El dispositivo de mediciones	9
4. Micro parcelas	10
5. Parcelas de medición del flujo por los tallos (stem-flow)	10
6. Parcelas de 50 m ²	11
7. Micro-cuencas con vertedor	12
8. Bateria de botellas-sifón	13
9. Dispositivo de medición con regla topográfica	13
10. Relación entre coeficiente de escurrimiento y superficie en las cuencas de la Sierra Madre Occidental	14
11. Espacio de las variables, ejes 1 y 2 (bosque)	22
12. Espacio de las variables, ejes 1 y 3 (bosque)	23
13. Espacio de las variables, ejes 1 y 2 (sabana)	29
14. Espacio de las variables, ejes 1 y 3 (sabana)	29
15. El tanque suelo-vegetación	34
16. Relación entre el coeficiente k y P ₀	34
17. Aportaciones y volúmenes almacenados en la Presa El Palmito	35
18. Coeficiente de escurrimiento por subcuencas de la RH 36	37
19. Mapa de las formas de erosión	41
20. El estado de la vegetación en 1972	42
21. El estado de la vegetación en 1992	42

INDICE DE CUADROS

Página

1. Erosión en micro-parcelas (g/m^2)	16
2. Escurrimiento en micro-parcelas (mm)	16
3. Coeficientes de escurrimiento en micro-parcelas (mm)	16
4. Erosión en parcelas de 40 m^2 (g/m^2)	16
5. Escurrimiento en parcelas de 40 m^2 (mm)	17
6. Coeficientes de escurrimiento en parcelas de 40 m^2 (%)	17
7. Erosión y escurrimiento en las dos micro cuencas en 1995	17
8. Variables que explican el escurrimiento	18
9. Variables que explican la erosión	18
10. Matriz de correlación de la erosión y del escurrimiento con las características físico-químicas del suelo en zona de bosque	21
11. Peso de los tres primeros componentes	22
12. Características de las parcelas	24
13. Escurrimientos medidos en zona de sabana	24
14. Erosión medida en zona de sabana	25
15. Escurrimiento y erosión, según categorías de medios	25
16. Coeficientes de la ecuación de escurrimiento en conglomerados por parcela	26
17. Coeficientes de la ecuación de escurrimiento en ignimbritas por parcela	26
18. Coeficientes de la ecuación de erosión en conglomerados por parcela	27
19. Coeficientes de la ecuación de erosión en ignimbritas por parcela	27
20. Erosión y escurrimiento en las microparcels	27
21. Matriz de correlación de la erosión y del escurrimiento con las características físico-químicas del suelo en zona de sabana	28
22. Peso de los tres primeros componentes	29
23. Características de las cuencas experimentales	31
24. Coeficientes de la ecuación de escurrimiento por cuenca	32
25. Coeficiente de escurrimiento por cuenca y por año	33
26. Parametros de la modelación global para cada cuenca	35
27. Evolución del número de árboles en cuatro sitios de pastizales	39
28. Degradación del bosque de las UAF de Guanaceví y Tepehuanes de 1972 a 1992	40

PRESENTACIÓN

Se presentan los resultados de cuatro años de muestreo en la Sierra Madre Occidental. Este trabajo sintetiza los estudios hechos por cinco estudiantes franceses (J.Poulenard, P.Y.Guédez, O.Henry, M.Torres, R.Dufeu) y seis estudiantes mexicanos (D. Viramontes, M.G.Rodríguez Camarillo, M. Buendía, A. Gómez, A. Buendía, C. Pérez), de 1994 a 1997.

Agradecemos también el apoyo que nos brindaron Henri Barral de ORSTOM y la Biol. Eva Anaya Nevárez, que contribuyeron a las mediciones de materia seca en los pastizales, y de la Lic. María Nelly Páez Pérez y la Lic. Laura Verónica Macías García por su apoyo en el campo y en el área de informática.

Siendo la formación un aspecto importante de la actividad de investigación tanto en el CENID-RASPA como en ORSTOM, la participación de los estudiantes de la UAAAN y del ISTOM (Institut des Sciences et Techniques d'Outre Mer), constituyó una labor activa y eficaz que se llevó a cabo durante estos cuatro años de mediciones.

Jean-François Nouvelot
Responsable del proyecto por parte del ORSTOM

RESUMEN

En cuatro años de mediciones se pudieron estimar la erosión y el escurrimiento de aguas superficiales en la cuenca alta del río Nazas. Esta se ubica en el Noroeste del Estado de Durango (México), y es la parte con más aguas superficiales de la Región Hidrológica 36.

La problemática principal de estos estudios fue de considerar que la sobreexplotación del medio ambiente y de los agro y pasto-sistemas podría a medio plazo producir algunos cambios irreversibles en el estado del bosque y de los pastos que a su vez podrían provocar cambios en los escurrimientos, y en fin sobre el clima.

La metodología utilizada ya es clásica en cuanto a los trabajos de campo, pero se utilizaron diversos tipos de medición, en áreas de diversas superficies, lo que, además de aportar más seguridad en las cantidades (de escurrimiento o de erosión), permite conocer los parámetros de la transferencia de escala, lo que es un problema eterno en hidrología: el comportamiento de un km² de cuenca no es la suma del comportamiento de un millón de m² de esta cuenca.

Los resultados resaltan la importancia del desmonte, del sobrepastoreo y de las degradaciones ya visibles o previsibles que se notan en el paisaje.

Confirman el papel de principal proveedora en aguas superficiales que tiene la cuenca alta del Nazas, participando con el 87 por ciento del abastecimiento en agua de la cuenca de la Región Lagunera; este aspecto hace aún más urgente la adopción de medidas de conservación del medio en la Sierra Madre, pues la RH 36 podría ser representativa de un problema que interesa a todo el noroeste de México, y muchos perímetros más de riego.

La erosión no es espectacular como la que se observa en climas semiáridos, en Estados Unidos o en la cuenca mediterránea, o en clima tropical, en las sierras del sur de la república. Pero se observa en amplias áreas una severa degradación de la vegetación y de los suelos que podría agravarse con el tiempo.

RESUME

Quatre années de mesures ont permis d'estimer l'érosion et l'écoulement des eaux de surface dans le haut Bassin du fleuve Nazas. Celui-ci se situe au Nord-Ouest de l'Etat de Durango (Mexique), et représente la zone de meilleure hydraulicité de la Région Hydrologique 36.

La problématique principale de ces études a été de considérer que la surexploitation du Milieu Naturel et de l'Agro-système pourrait à moyen terme produire quelques changements irréversibles sur l'état des forêts et des pâturages, et ceux-ci à leur tour pourraient provoquer des modifications du ruissellement, voire des conditions climatiques.

La méthodologie utilisée est classique quant aux travaux de terrain, mais on a utilisé ici divers types de mesures, sur des superficies variées, ce qui, en plus d'apporter plus de certitude sur les quantités brutes (d'écoulement et d'érosion), permet de connaître les paramètres du transfert d'échelle, ce qui est l'éternel problème de l'hydrologie: le comportement d'un km² de bassin-versant n'est pas la somme des comportements de un million de m² de ce bassin.

Les résultats permettent de se rendre compte de l'importance du déboisement et du surpâturage, et des dégradations d'ores et déjà visibles ou prévisibles dans le paysage.

Ils confirment le rôle de principale zone d'approvisionnement en eaux de surface du haut-bassin du Nazas, qui participe pour 87% du total des eaux de surface de la Laguna; cela rend d'autant plus urgente l'adoption de mesures de conservation du Milieu dans la Sierra Madre, puisque la RH36 pourrait bien être représentative d'un problème qui concerne tout le Nord-Ouest du Mexique, et bien d'autres périmètres irrigués.

L'érosion n'est pas spectaculaire comme celle que l'on observe, dans des climats également semi-arides, aux Etats-Unis ou dans le Bassin Méditerranéen, ou, en climat tropical, dans les montagnes du sud du Mexique. Mais on observe sur de vastes superficies une grave dégradation de la végétation et des sols qui pourrait encore s'accroître avec le temps.

ABSTRACT

Four years of measurements allowed to get an estimation of erosion and superficial waters runoff in the río Nazas higher basin. This one is located in Northwest of state of Durango (Mexico), and it's the area with higher runoff index in the Hydrological Region 36.

In these studies, the first problematic was to consider that the over-exploitation of environment and agro-systems could, at medium place, produce some irreparable changes in state of forests and pastures and have consequences on runoff and climatic conditions.

The methodology used here is classical about fields measurements, but several types of measures, applied on different superficies were used to have more precision and security in quantitative results (of erosion and runoff), allows to know the scale transfer parameters, this eternal problem of hydrologists: runoff in a 1 km² basin isn't the amount of one million m² runoff.

Results allow to know the severe deforestation and overgrazing, and the obvious and foreseeable degradations which it's possible to see in landscape.

They corroborate the main role about superficial waters that have the río Nazas higher basin, which brings 87 percent of total anual runoff in Comarca Lagunera's irrigation district; this point rewards more urgent some decisions in conservation of environment in the Sierra Madre, seeing that the RH 36 could be representative of a problem which regards whole Northwestern Mexico, and some others irrigated districts.

Erosion isn't spectacular like that observed, in same semiarid climates, of the United States or in the Mediterranean Basin, or in tropical climate, in the Southern Mexico mountains. But in great areas the soils and vegetation degradation is obvious, which could make worse in the future.

EROSION Y ESCURRIMIENTO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

Luc Descroix, Jean-François Nouvelot***

*(*Encargado de investigación, hidrólogo ORSTOM; ** Director de investigación, hidrólogo ORSTOM)*

I. PRESENTACIÓN DE LA REGIÓN Y DE LA PROBLEMÁTICA.

Este estudio se llevó a cabo en la parte subhúmeda de la Región Hidrológica 36 (RH 36), es decir, en la cuenca alta del río Nazas. Las mediciones se hicieron en las cuencas experimentales del proyecto CENID-RASPA (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera)/ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) en los ejidos de: Escobar y Anexos; Boleras, Pilitas y Pitorreal; así como el de La Posta de Jihuites, ubicados en el municipio de Guanaceví (Dgo.) (Figura 1).

Se ubica entre 2 100 y 3 000 msnm, en una región cuyo substrato está constituido por ignimbritas, tobas riolíticas y conglomerados de ambas. La vegetación natural comprende pastizales y sabanas de encinos que se desarrollan a una altitud de 2 000 a 2 300 metros, bosques de encino (de 2 200 a 2 400 metros), de encino y pino (2 400 a 2 600), y de pino-encino y pino arriba de 2 600 metros.

Los ejidos se constituyeron recientemente (de 1948 a 1970), sustituyendo haciendas de decenas de miles de hectáreas. Estas practicaban una ganadería extensiva (de ganado bovino, ovino y caprino), en los pastizales naturales, los únicos cultivos eran maíz y frijol para los habitantes. El sistema de explotación ejidal cambió poco, se concentró la explotación en la ganadería bovina, se extendieron los cultivos a la mayor parte de las zonas llanas para nutrir una población creciente y también para poder dar más forraje al ganado (maíz y avena). La parte más alta de la sierra (que está cubierta esencialmente de bosque de pino) es explotada desde hace más de 20 años por su madera, valorizada en los aserraderos de Tepehuanes, Guanaceví, Santiago Papasquiari y otros más.

Esta región constituye una importante zona de abastecimiento de agua en la RH 36. Se estima que un 87 por ciento de las aguas superficiales de toda la RH 36 provienen de la cuenca del Nazas aguas arriba de la presa El Palmito (20 por ciento de la superficie total). Localmente esta agua es poco aprovechada, ya que en un año promedio, con una pluviometría de 600 mm, los pastizales tienen buen rendimiento, y los cultivos también. Esto significa que las aguas superficiales de la cuenca alta del río Nazas sirven sobre todo para abastecer las zonas más secas, esencialmente el perímetro de riego de la Laguna.

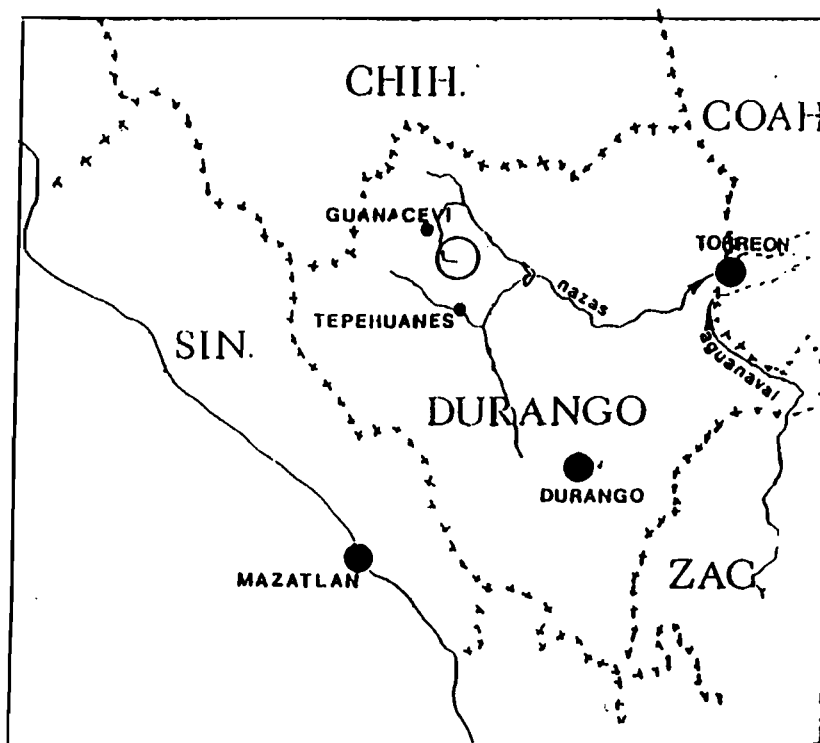


Figura 1. La Región Hidrológica 36 y el área de estudio.

Uno de los objetivos del proyecto es analizar cómo el desmonte y el sobrepastoreo pueden amenazar la seguridad del recurso hídrico. Algunos autores (Roose, 1973; Rougerie, 1978;

Cosandey, 1992; etc.) han mostrado el papel del manto vegetal (bosque o pastizales) en relación al escurrimiento de las aguas y la erosión de los suelos. Este papel es aún más importante en áreas de montaña.

Los estudios ya realizados permitieron evidenciar un grave sobrepastoreo (Barral y Anaya, 1995; Poulenard, 1995; Poulenard *et al.*, 1996) en casi toda la cuenca alta del río Nazas, así como un rápido desmonte en las partes más elevadas de esta (Descroix *et al.*, 1995; Guédez, 1996; Rodríguez, 1997; Henry, 1997). Ambos tienen consecuencias importantes sobre el escurrimiento y la erosión (Gómez, 1997).

Existe un debate científico sobre el impacto de la desaparición de la cubierta vegetal y su impacto sobre la erosión y el escurrimiento. Es obvio que el desmonte y el sobrepastoreo incrementan la erosión (debido a la desaparición de la protección vegetal) así como el escurrimiento. Sin embargo, existe la duda en cuanto al volumen total anual de los escurrimientos en una cuenca. Se supone que el desmonte acelera el escurrimiento instantáneo y la erosión, incrementándose de hecho las avenidas cuando desaparece la cubierta vegetal. Esto se ha comprobado en muchas partes del mundo; particularmente, en el caso de la cuenca mediterránea en los dos últimos milenios se han presentado varias fases de sobrepoblación seguidas de períodos de despoblación. En los Alpes del Sur (Descroix, 1994 y 1996), los documentos históricos y arqueológicos (archivos municipales o parroquianos) coinciden con los datos geomorfológicos (forma de los cauces, datación por carbono 14 de los yacimientos ocupados, sedimentación diferencial en lagunas así como el estudio de polen) además de la existencia de numerosos experimentos y observaciones que se han realizado en la actualidad en estas zonas que se pueden considerar bien conocidas y estudiadas. Es evidente también que al analizar el ciclo del agua en zonas desmontadas la proporción de agua « perdida » en la parte superficial del ciclo del agua es menor debido al decremento de la infiltración y evapotranspiración. Los inmigrantes de origen europeo en Argelia desmontaron a propósito las cuencas de los ríos sobre los cuales construyeron presas, con el objetivo de asegurar mayor aporte de agua (Descroix, 1994). Sin embargo, esto ocasionó un incremento de los sedimentos, y la cuenca mediterránea presenta centenares de presas totalmente azolvadas, tanto al Norte (España, Francia, Italia, Turquía) como al Sur (Africa del Norte).

A nivel anual, se notó en varios casos que finalmente disminuía el volumen total escurrido después de un desmonte, a la escala de toda la cuenca. En zonas boscosas, el aumento de la evapotranspiración y de la infiltración es compensado de inmediato por los escurrimientos de subsuelo y subterráneos; tras pocos años, en las zonas desmontadas, se nota una disminución de la pluviometría por falta de « rugosidad » para frenar y alzar las masas de aire húmedo.

Si la intensidad del impacto es discutida, en cambio todos los especialistas admiten que existe.

LAS FORMAS DE EROSION Y DE ESCURRIMIENTO.

Tradicionalmente, se dividen los fenómenos y las formas de erosión hídrica en dos grandes categorías según si su acción es localizada o generalizada.

- La erosión lineal es la que provoca una excavación del suelo guiada por flujos hidráulicos: se pueden formar canalitos (hasta 20 cm de profundidad), cárcavas (hasta 2-3 metros de profundidad) o torrentes (hasta varias decenas de metros de profundidad), según la importancia

de la concentración de los escurrimientos, de la turbulencia, la resistencia del suelo y de la roca madre, y la distancia al talweg emisor o la presencia de un piso más resistente.

- La erosión auroleada es debida a un escurrimiento laminar que no se concentra. Es más característica de bajadas en las zonas semi-áridas, y en vez de traducirse por la formación de cárcavas se caracteriza por un adelgazamiento general del suelo en grandes superficies. En zona de montaña, debido a las grandes pendientes, se mezclan los dos tipos de erosión. La erosión hídrica auroleada también incluye los problemas de soliflucción, debidos a la saturación del suelo o de la roca madre en agua, y al traspaso de los límites de Atterberg (límites de plasticidad o de liquidez).

En la mayor parte de la Sierra Madre, al Norte del Estado de Durango, la forma más importante de la erosión en la zona de sabana de altitud y de bosques (arriba de 2 000 metros de altitud) es auroleada, pero sin fenómenos de soliflucción, debido a la escasez de arcillas en los suelos, a pendientes moderadas (comparativamente con montañas más jóvenes del sur de México, con los Andes o con los Alpes por ejemplo), y al hecho de que el invierno es normalmente seco (menos de 50 milímetros de lluvia en promedio de diciembre a marzo), lo que evita que se almacenen grandes cantidades de hielo en el suelo.

De hecho se observan pocas cárcavas (Descroix *et al*, 1995), y las que se ven se concentran en los lugares más cercanos a los poblados, lugares cultivados o pastoreados desde hace mucho tiempo. La mayor parte de la degradación se puede describir como lo hace Viramontes (1995) en la Figura 2. Se dice comúnmente que « crecen las piedras », pues el adelgazamiento del suelo descubre piedras incluidas en él. Esto se debe a la fuerza erosiva del escurrimiento laminar que transporta sedimentos paso a paso, sin concentrarse, pero empobrece los suelos en grandes superficies; también estas piedras acaban por proteger el suelo de la misma erosión hídrica.

II. METODOLOGÍA.

El principio de la medición del escurrimiento y de la erosión es el mismo; se trata de captar el agua para medir su volumen y su contenido en sólidos.

Las mediciones se hicieron en parcelas y cuencas de tamaño y características físicas diferentes, para poder estudiar un cierto número de parámetros con un impacto en la erosión o el escurrimiento.

El dispositivo completo aparece en la Figura 3.

Este dispositivo incluye principalmente parcelas y cuencas. Más precisamente, se utilizaron los equipos siguientes:

1- Micro-parcelas: de 0.5 m² (Figura 4) con tanque de 20 litros, que permiten captar y almacenar el volumen total del agua y sólidos escurridos durante un evento;

- se instalaron 14 micro-parcelas en la zona de sabana (pastizales) y 14 en la zona de bosque de pino; estas parcelas ligeras y fáciles de instalar se pueden multiplicar para tomar en cuenta todos los elementos espaciales que influyan sobre el escurrimiento y la erosión (efecto splash sobre todo); en este caso se hizo variar pendiente, litología, presencia o no de árboles, presencia o no de hojarasca en el suelo;

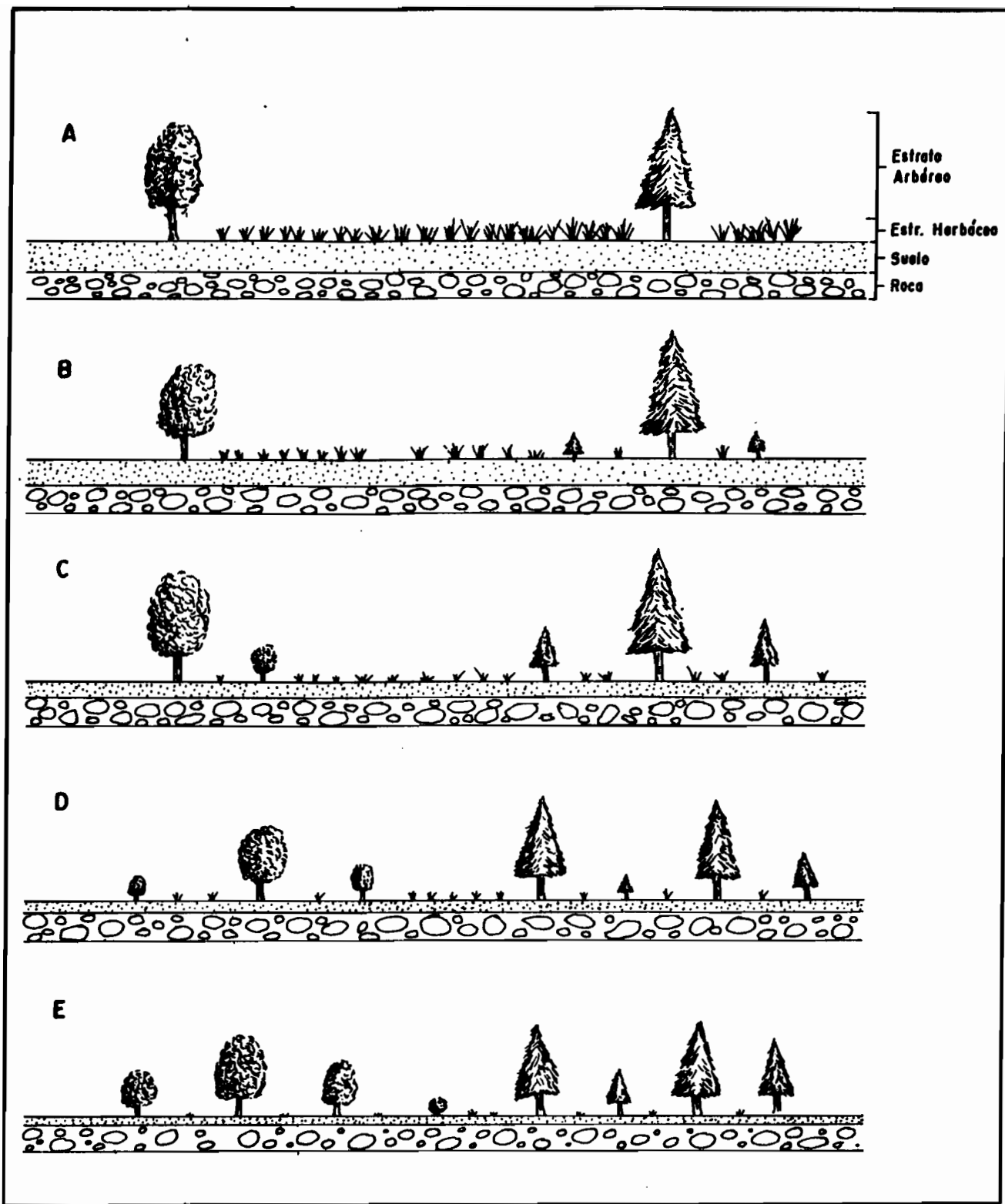


Figura 2. Etapas de evolución del ecosistema como consecuencia del uso actual del suelo.

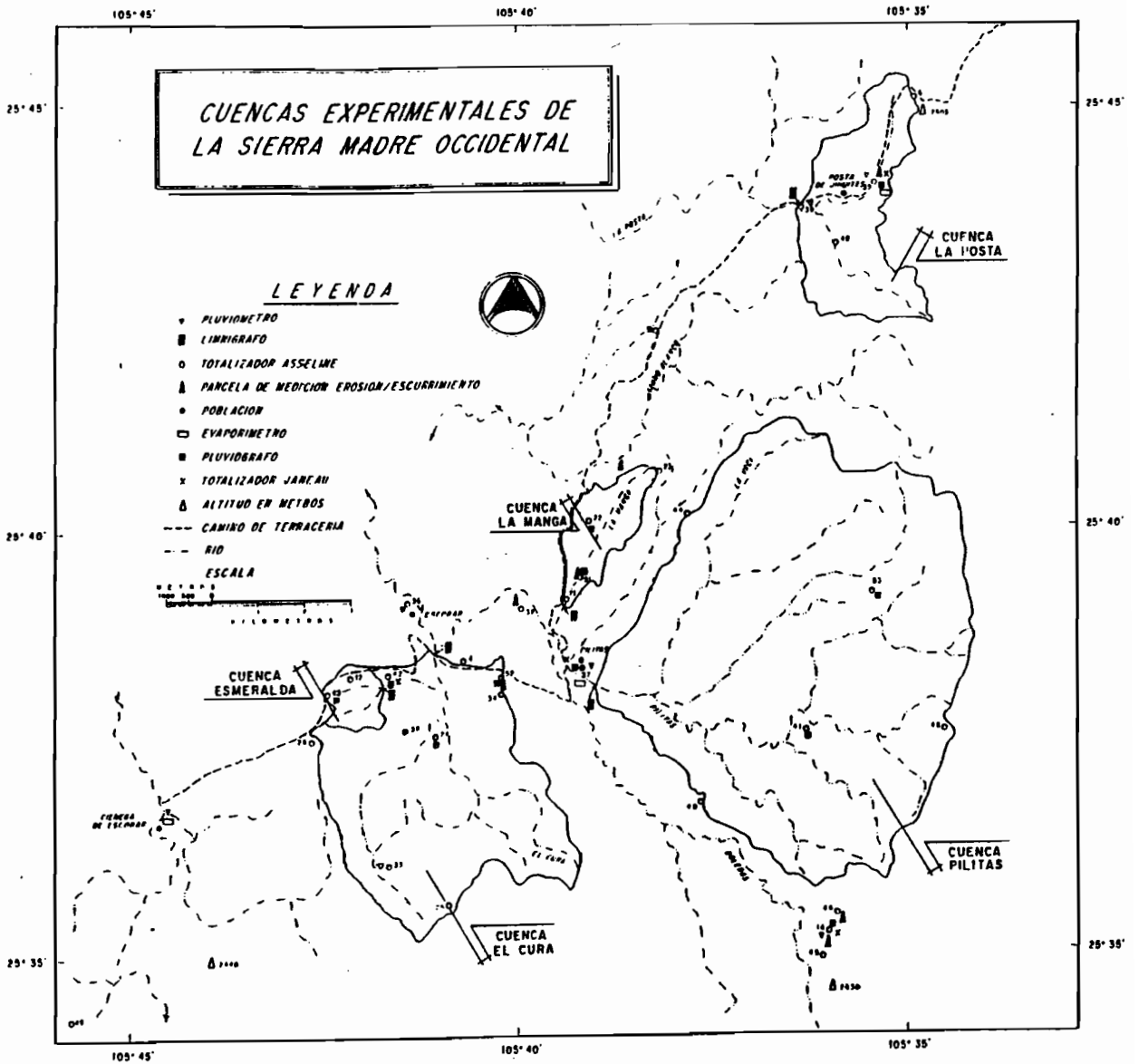


Figura 3. El dispositivo de mediciones.

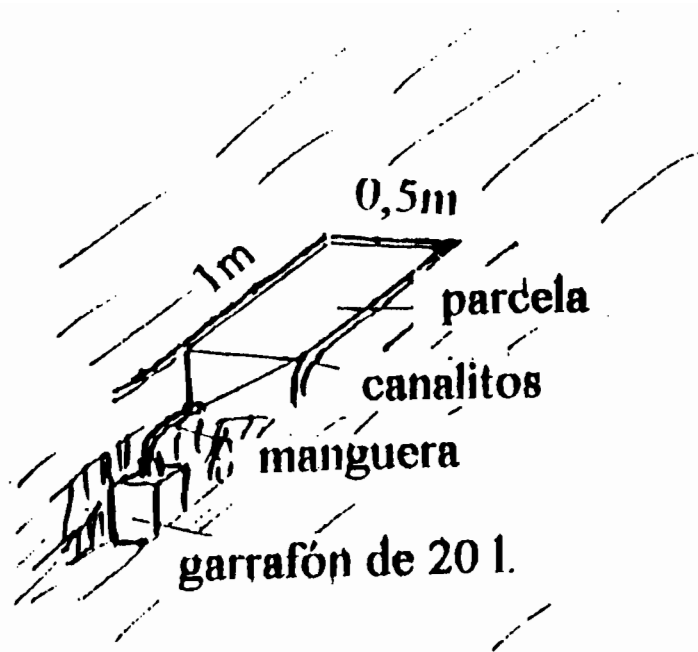


Figura 4. Micro parcelas.

2- Parcelas de medición del flujo por los tallos (stem flow): dispuestas al pie de un árbol (Figura 5), miden la parte del agua de lluvia, captada por el árbol, que se escurre a lo largo del tronco;

- se instalaron cuatro en la zona de sabana y cuatro en la zona de bosque; se pudo así comparar el comportamiento de los pinos con el de los encinos;

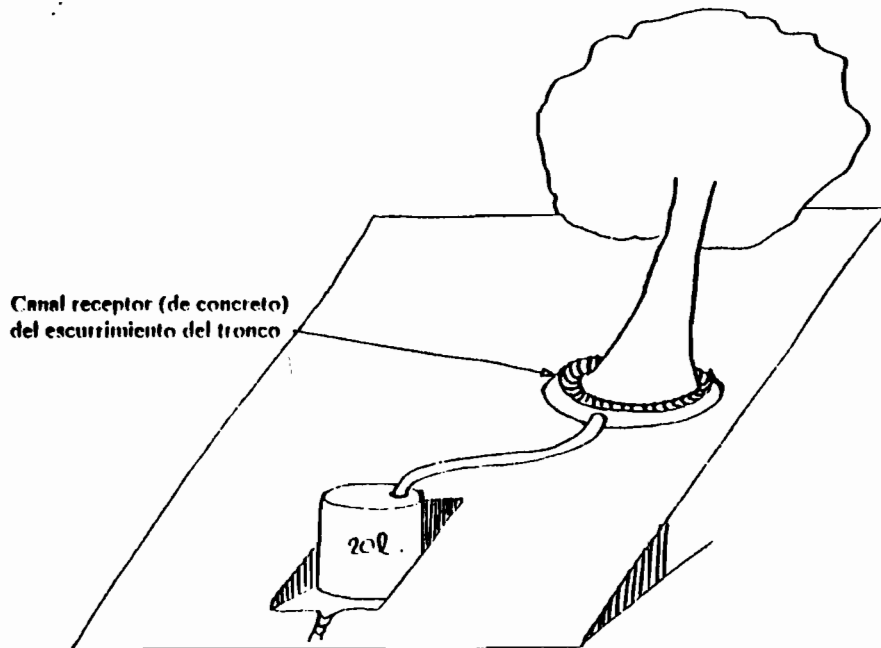


Figura 5. Parcelas de medición del flujo por los tallos (stem-flow).

3- parcelas de 50 m²: también se supone que captan el volumen total del agua escurrido en la parcela; pero por cuestión de facilidad de mantenimiento, se limita el volumen almacenable a 1m³ (Figura 6), lo que tiene como consecuencia que en caso de lluvia superior a 20 mm con intensidad fuerte, pueden desbordarse: en tal caso, el observador tiene que estar presente para muestrear el agua que desborde, y no perder el dato; aunque este dispositivo es más pesado, se pudieron instalar 13 de estas parcelas:

- Tres en zona de bosque (una debajo del árbol, otra sin árbol pero cubierta de hojarasca, la última sin árbol y sin hojarasca);

- Diez en zona de sabana, con dos litologías diferentes (ignimbrita y conglomerados), dos clases de pendiente, presencia o no de un árbol, y presencia o no de clausura;

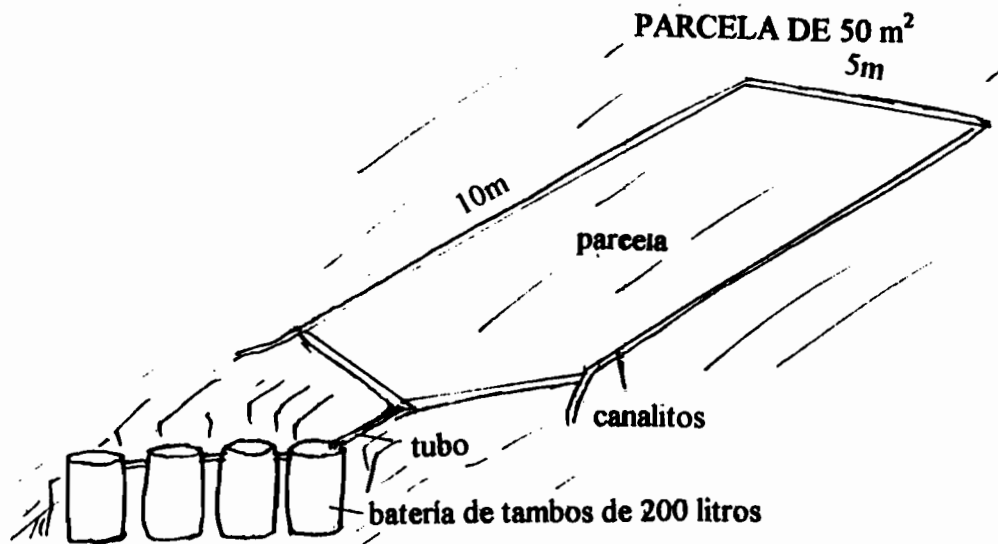


Figura 6. Parcelas de 50 m².

4- micro-cuencas de 400 a 10 000 m², con vertedor triangular a la salida (Figura 7), en las que no se pretende retener todo el volumen escurrido pero sí las partículas sólidas que se pesan después de cada evento; se instalaron:

- dos micro-cuencas de 1000 y 10 000 m² en zona de sabana (dos litologías);

- dos en zona de bosque; en este último caso se equiparon dos cuencas colindantes de 450 m², de misma pendiente y muy comparables en todo (litología, vegetación, etc.) y se desmontó una de las dos al centro de la primera temporada de observaciones; luego se comparó la evolución de ambas;

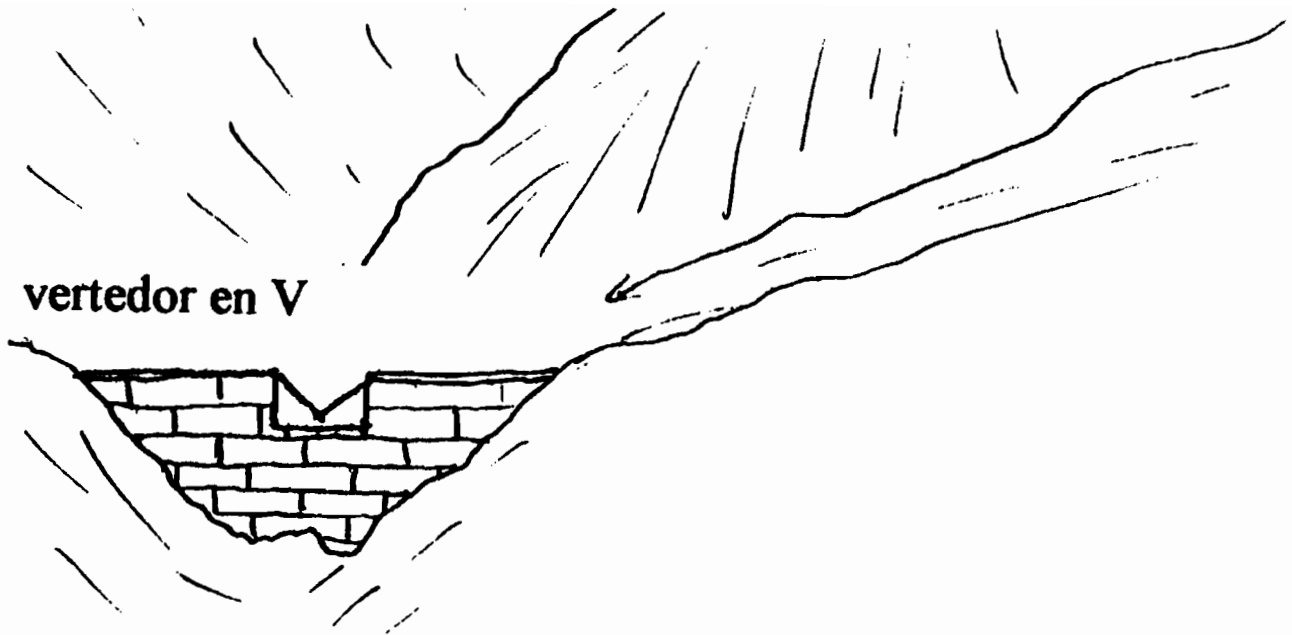


Figura 7. Micro-cuencas con vertedor.

5- cuencas instrumentadas con limnigrafos en secciones fijas; en estas (Figura 3), se mide el volumen escurrido de manera clásica (transformación de nivel de agua en gasto por una ecuación o curva de calibración), y se sacan muestras de agua en las avenidas para conocer su carga de sólidos. De esta manera, se instrumentaron cinco cuencas:

- La Posta, 8.62 km², en ignimbritas, sobrepastoreada;
- La Manga, 3.08 km², en conglomerados, con sabana de encinos;
- Pilitas, 51.8 km², en ignimbritas y conglomerados con bosques y sabanas;
- El Cura, 21.8 km², en ignimbritas, con bosques;
- Esmeralda, 1.5 km², en ignimbritas, con bosque de encino.

Se completó este equipo con:

- Dos baterías de botellas-sifón, en las cuencas Esmeralda y La Manga (Figura 8) para tomar muestras de agua al momento de las avenidas de manera automática, sin presencia del observador (inconveniente: solo sacan muestras después de un volumen de agua escurrido).

- Un intento de medir la erosión aureoleada en dos sitios (Aguaje y La Posta) con la « regla topográfica » (aparato simple para medir la micro-topografía) que permite medir la evolución del suelo y la excavación de cárcavas evento por evento (Figura 9); finalmente no se utilizó este sistema para cuantificar la erosión, ya que es demasiado débil para medirse con este instrumento; sin embargo, se pudo explicar la formación de cárcavas, por erosión progresiva aguas arriba, y por erosión regresiva aguas abajo, ya que la regla, que funciona como un rugosímetro, permite sacar perfiles de terreno con rapidez y precisión.

También se puede, a menor escala, disponer de los datos de dos batigrafías realizadas desde su creación en 1946, en la presa de El Palmito (cuenca de 18 000 km²) para medir su azolve.

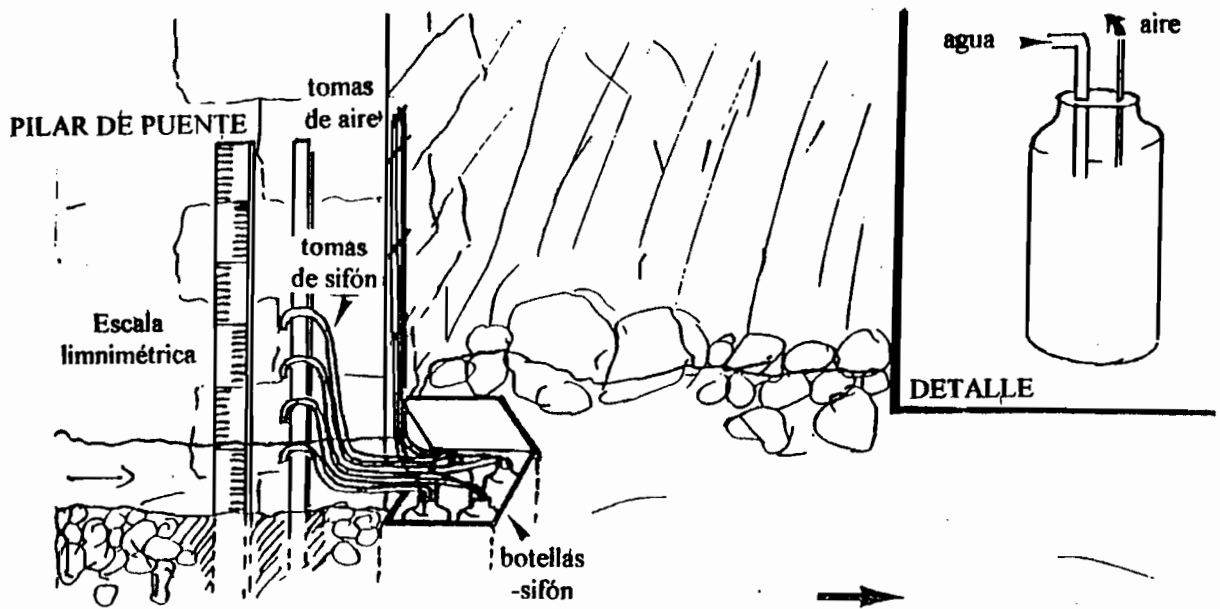


Figura 8. Bateria de botellas-sifón.

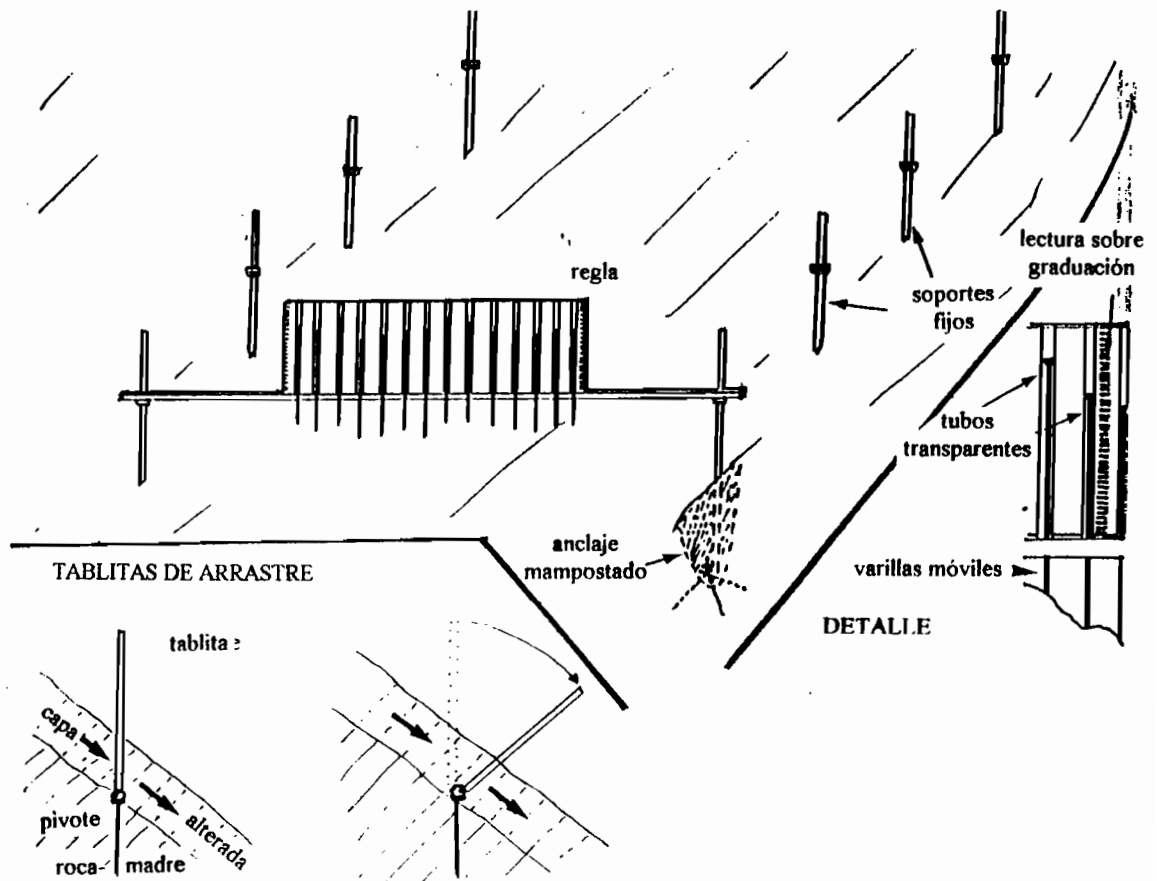


Figura 9. Dispositivo de medición con regla topográfica.

Para conocer los datos climáticos se dispone, a parte del equipo de la red de CONAGUA (estaciones de Santa María del Oro, San Bernardo, Guanaceví, El Zape, Cienega de Escobar y Tepehuanes), de nueve pluviógrafos (seis mecánicos y tres electrónicos), cuatro pluviómetros, 53 totalizadores pluviométricos y tres tanques evaporímetros. La red pluviométrica es bastante fina para conocer la distribución espacial de las precipitaciones a nivel diario y muchas veces a nivel de evento, y para estos casos poder sacar un mapa de isoyetas (paquete Surfer).

Las muestras de agua y de sedimentos fueron procesadas en el laboratorio del CENID RASPA. En cuatro años de medición se pudieron aprovechar los datos de 4 000 muestras a pesar de que los años 1994 y 1995 fueron muy secos (después de un 1992 muy seco también y de un 1993 deficitario de 20 por ciento, al contrario al resto de la Sierra, en que fue excedentario en lluvias, en relación con los promedios). El año 1996 fue ligeramente excedentario en volumen de lluvias (5 a 10 por ciento), pero más en escurrimientos, debido a la repartición de las lluvias: más de la mitad de éstas cayó entre el 22 de agosto y el 15 de septiembre, y la saturación del suelo provocó altas tasas de escurrimiento.

III. EROSIÓN Y ESCURRIMIENTO.

A- CONDICIONES GENERALES

Los estudios de erosión y escurrimiento se hacen por lo general juntos, debido a que el equipo de campo es mayoritariamente el mismo. En ambos casos, se nota que los coeficientes de escurrimiento y las tasas de erosión casi siempre van disminuyendo conforme aumenta la superficie del área de estudio. Esto se puede apreciar en la Figura 10 que muestra para 1996 la relación de los valores de logaritmo de los escurrimientos y de la superficie de interés.

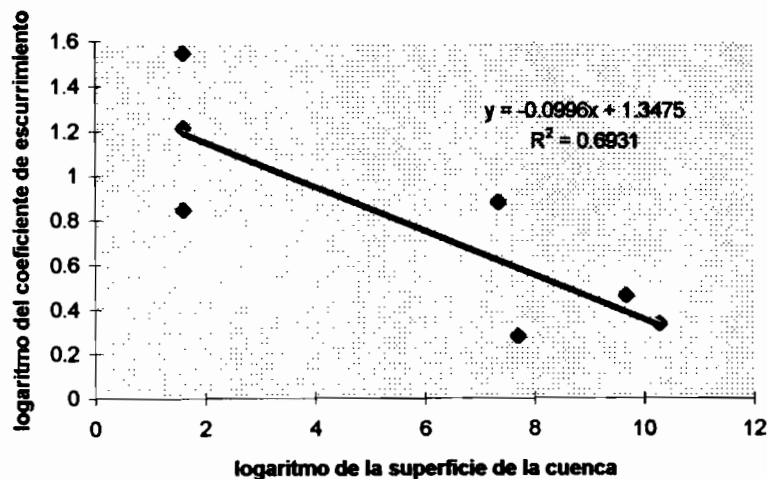


Figura 10. Relación entre coeficiente de escurrimiento y superficie en las cuencas de la Sierra Madre Occidental.

Para estudiar los factores de la erosión y del escurrimiento, se hizo un estudio estadístico de los datos de campo recogidos en cuatro años de mediciones. Se compararon la erosión (en g/m^2 o en $Ton\ ha^{-1}$) y el escurrimiento (en lámina en mm) con los datos siguientes:

- Lluvias útiles: cantidad de lluvia (en mm, como la precipitación total) caída con una intensidad superior a cierto rango; intensidad, para cierta cuenca y a un momento dado, a partir de la cual empieza teóricamente el escurrimiento. Se denominará PU2, por ejemplo, a la lluvia útil en 2 mm/h, es decir la parte de la precipitación que cayó con una intensidad superior a 2 mm/h. Aquí se usaron las lluvias útiles con rangos de: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 mm/h. Esta información se consigue, a partir de pluviogramas de aparatos pluviográficos electrónicos (marca Elsyde, tipo Oedipe) o mecánicos (marca Rossbach, tipo R IV). Estos pluviogramas se digitalizan (o se procesan directamente, si se trata de un aparato electrónico) y se accesan con los paquetes ARES, PLUVIOM, PLUGRAPH y PCE para extraer una información precisa a nivel de evento.

- Las intensidades máximas para ciertos rangos de tiempo. Datos que se consiguen con el paquete PLUGRAPH. Se utilizaron aquí las intensidades máximas en 0 (instantánea), 1, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 240 minutos.

- la energía cinética, medida con la fórmula de Wischmeier:

$$Ec = 11.9 + 8.72 \cdot \log(I)$$

donde: $Ec =$ Energía cinética en $joules/m^2$

$I =$ Intensidad de la lluvia en mm/h: se utilizó aquí, para cada clase, el valor del centro de la misma. Ejemplo, para el rango de 5 a 10 mm/h se usa la fórmula con $\log(7.5)$ y se multiplica el resultado por el número de milímetros caídos con este rango de intensidad.

- El índice de Kolher (IK), también llamado IPA (Indice de Precipitaciones Anteriores), que es una indicación teórica de la humedad del suelo al principio de una precipitación, basada en el tiempo transcurrido desde la última precipitación y la cantidad de ésta. Se formula así:

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t}$$

donde:

$IK_n =$ Índice de Kolher de la lluvia n

$IK_{n-1} =$ Índice de Kolher de la lluvia $n-1$

$P_{n-1} =$ Precipitación de la lluvia $n-1$

$\alpha =$ coeficiente de calibración, que se utilizó aquí de 0.1 hasta 0.9.

Ejemplo: $IK1 = IK$ con $\alpha = 0.1$, etc.

$t =$ tiempo en minutos transcurrido entre el final de la lluvia de rango $n-1$ y el principio de la lluvia n .

B- EN ZONA DE BOSQUE

El sitio experimental escogido fue el lugar llamado La Rosilla, a 10 km al Sur de Boleras, ubicado a 2 500 metros de altitud, en un bosque denso de pino-encino y de pino. Esta zona es la parte más baja de la zona de explotación forestal « Boleras » de la Unidad de Administración Forestal (UAF) de Tepehuanes. Está situada al Norte de la Sierra La Candela. Se escogió por ser representativa del estado medio del bosque en esta área, con formaciones, densidades y tipo de explotación promedios de la región.

Se pudieron hacer dos temporadas de medición en esta zona, en 1995 y 1996, que resultaron ser muy diferentes en su pluviometría, con un fuerte déficit pluviométrico en 95 y un ligero excedente en 96.

EROSIÓN Y ESCURRIMIENTOS.

Los resultados medidos en parcelas de medio metro cuadrado son los que aparecen en los Cuadros 1, 2 y 3.

CUADRO 1. EROSION EN MICRO-PARCELAS (g/m²).

	Pinos	Encinos	P.débil	P.mediana	P.fuerte	Con árbol	Sin árbol
Años	7 parcelas	7 parcelas	6 parcelas	4 parcelas	4 parcelas	6 parcelas	6 parcelas
1995	78	42	23	120	59	18	108
1996	70	47	38	100	48	13	102

(P = pendiente)

CUADRO 2. ESCURRIMIENTO EN MICRO-PARCELAS (mm).

	Pinos	Encinos	P.debil	P.mediana	P.fuerte	Con árbol	Sin árbol
Años							
1995	23	6	12	24	8	4	23
1996	67	33	48	63	39	42	72

(P = pendiente)

CUADRO 3. COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO EN MICRO-PARCELAS (mm).

	Pinos	Encinos	P.debil	P.mediana	P.fuerte	Con árbol	Sin árbol
Años							
1995	7	1.9	3.75	7.5	2.5	1.25	7.2
1996	11.4	5.6	8.1	10.7	6.6	7.12	12.2

(P = pendiente)

En las parcelas de 40 m² del mismo sitio de la Rosilla, los resultados medidos fueron los que aparecen en los Cuadros 4, 5 y 6:

CUADRO 4. EROSION EN PARCELAS DE 40 m² (g/m²).

	Sin árbol ni mantillo	Sin árbol pero con mantillo	Con árbol
Años			
1995	117.3	16.4	1.17
1996	149.2	44.8	1.05

CUADRO 5. ESCURRIMIENTO EN PARCELAS DE 40 m² (mm).

	Sin árbol ni mantillo	Sin árbol pero con mantillo	Con árbol
Años			
1995	34.2	11.6	6.8
1996	206.2	78.9	21.0

CUADRO 6. COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO EN PARCELAS DE 40 m² (%).

	Sin árbol ni mantillo	Sin árbol pero con mantillo	Con árbol
Años			
1995	10.7	3.63	2.13
1996	35	13.4	3.6

Las dos cuencas vecinas de las cuales una fue desmontada al principio de la temporada de lluvias, se observaron en 1995 con los resultados siguientes:

CUADRO 7. EROSION Y ESCURRIMIENTO EN LAS DOS MICRO CUENCAS EN 1995.

Microcuenca	Natural	Desmontada
Erosión en Kg ha-1	254	140
Escorrimento en mm	5	9
Coefficiente de escurrimiento en %	2.14	3.75

VARIABLES EXPLICATIVAS DE LA EROSIÓN Y EL ESCURRIMIENTO.

Se instalaron las microparcels de la Rosilla para poder analizar el papel de cada variable explicativa de la erosión y el escurrimiento a nivel de la función de producción (potencialidad). En los cuadros se agruparon las parcelas según las características que las definen.

En los datos brutos (Cuadros 1 a 3) se nota que:

- La erosión quedó en los mismos valores aproximadamente entre 1995 y 1996 a pesar de una pluviometría muy diferente: 320 mm en 1995 y 590 mm en 1996. De hecho, basta con un solo evento anual para conseguir la mayoría de la erosión total.

- Los volúmenes escurridos fueron de tres a diez veces más importantes en 1996 que en 1995, lo que produjo coeficientes de escurrimiento de 1.5 a seis veces más grandes que en 1995.

- Erosión y escurrimiento son más importantes en bosque de pino que en bosque de encino.

- En cambio, las pendientes no tienen un papel tan evidente: si crecen entre parcelas de pendiente débil (6 a 9 grados) a mediana (14-16 grados) al contrario van disminuyendo entre parcelas de pendiente mediana a pendiente fuerte (27 a 37 grados); las parcelas son muy pequeñas para analizar esta variable; los parámetros principales dominan demasiado para que aparezca una variable secundaria.

- En fin se nota que la erosión y el escurrimiento son mucho más importantes fuera de la cubierta de un árbol que debajo de ésta.

Las parcelas de superficie intermedia (40 m²), dieron resultados mucho más clásicos tanto en erosión como en escurrimiento.

- Se nota que la erosión es 100 veces más importante en un área despejada y con poca vegetación (pasto degradado) que en una área de bosque.

- El escurrimiento también es mucho más importante en la parcela con menos vegetación.

- La tercera parcela estaba dominada por árboles, que fueron cortados al principio de la temporada de lluvias de 1995. De hecho, ya no está protegida por ningún árbol, pero sí se dejó la hojarasca y el mantillo existentes. El resultado es que erosión y escurrimiento tienen valores intermedios entre las otras dos parcelas, pero su comportamiento se parecía más al de la parcela con árboles en 1995 y se acercó al de la parcela despejada en 1996.

VARIABLES TEMPORALES: CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS.

En los Cuadros 8 y 9 vienen las variables explicativas de la erosión y el escurrimiento a nivel del evento pluviométrico.

CUADRO 8. VARIABLES QUE EXPLICAN EL ESCURRIMIENTO.

Parcela	Variable 1	Variable 2	Constante	R ²
(Esgurrimiento) ^{0.5}	PU2	IN60*IK1		
Pino	0.0154	0.0022	+ 0.37	0.87
Encino	0.0064	0.0031	+ 0.087	0.86
Pendiente débil	0.0082	0.0021	+ 0.126	0.86
Pendiente mediana.	0.0108	0.0018	+ 0.284	0.87
Pendiente fuerte	0.0077	0.0018	+ 0.152	0.88
Con árbol	0.0087	0.0016	+ 0.052	0.81
Sin árbol	0.0127	0.0028	+ 0.336	0.88

PU2: Lluvia útil con intensidad > 2 mm/h.

IN60*IK1: Intensidad máxima en 60 minutos * índice de Kohler ($\alpha=0.1$).

CUADRO 9. VARIABLES QUE EXPLICAN LA EROSIÓN.

Parcela	Variable 1	Variable 2	Constante	R ²
Erosión	(15) ²	(160) ²		
Pino	0.0055	0.084	1.167	0.87
Encino	0.0021	0.138	-1.755	0.67
Pendiente débil	0.003	0.036	-1.6	0.77
Pendiente mediana	0.0031	0.061	2.89	0.73
Pendiente fuerte	0	0.107	-1.08	0.78
Con árbol	0.001	0.015	0.166	0.86
Sin árbol	0.0039	0.181	0.698	0.83

(15)²: Intensidad máxima en 5 minutos al cuadrado.

(160)²: Intensidad máxima en 60 minutos al cuadrado.

En las microparcels el comportamiento hidro-erosivo se pudo caracterizar con regresiones múltiples paso a paso (con el paquete Statgraphics), con las mismas variables a cada vez. Esta homogeneidad se debe al tamaño parejo de las parcelas y a la similitud de las condiciones pluviométricas. También hay que precisar que los suelos son muy similares en todas, a pesar de que están en estados de degradación diversos según las parcelas.

En las 14 parcelas la primera variable explicativa del escurrimiento fue la lluvia útil con intensidad superior a 2 mm/h (PU2), lo que significa que casi toda la lluvia de un evento influye en el escurrimiento de la parcela, o que a partir de una intensidad de 2 mm/h pueden escurrir estas parcelas.

La segunda variable fue, en todos los casos, el producto de la intensidad máxima alcanzada en 60 minutos por el índice de Kolher (con $\alpha = 0.1$). Esto significa que la intensidad de la precipitación actúa sobre todo después de un tiempo de una hora con cierto rango de intensidad; la intervención del IK1 (índice de Kolher) indica que el estado de humedad preliminar del suelo también tiene un papel en el escurrimiento.

En cuanto al valor de los coeficientes, se confirma que el escurrimiento es más importante en bosque de pino que en bosque de encino; así mismo, que la pendiente tiene un papel ambivalente, y que el escurrimiento es inferior debajo de un árbol que en un sitio despejado.

Para la erosión también se pudieron utilizar dos variables comunes a todas las parcelas. En este caso, fueron la intensidad máxima en cinco minutos, elevada al cuadrado ($I5^2$), y la intensidad máxima en una hora ($I60^2$), lo que parece significar que tanto las lluvias cortas como las lluvias más largas tienen un papel en la formación de la erosión.

El comportamiento diferencial de cada tipo de parcela permite destacar:

- Que las intensidades en corta duración tienen más importancia en el caso de un bosque de pino que en un bosque de encino; esto se puede explicar por una hojarasca más espesa en los bosques de encino, que también explica por qué la intensidad máxima en una hora tiene mayor coeficiente en un bosque de encinos: es el tiempo que requiere el mantillo y la hojarasca para saturarse y empezar a producir exportación de sedimentos;

- Se observa el mismo fenómeno para las pendientes: en el caso de pendientes débiles y medianas, la intensidad máxima en cinco minutos es la que explica más el fenómeno de erosión; en cambio, para pendientes fuertes, la intensidad máxima en una hora abarca más importancia. Esto se debe tal vez al fenómeno de inmunidad de las pendientes fuertes, que hace disminuir el impacto de la energía cinética en estas partes, pues para una lluvia equivalente, esta energía se reparte en una área mayor, entonces es más débil por unidad de superficie. También hay que notar que las gotas que caen verticalmente tienen un impacto oblicuo, menos eficaz y en parte amortizado, en relación con las que caen en un lugar horizontal, pero este elemento es difícil de analizar, pues en los eventos pluviométricos de alta intensidad la lluvia cae seguido con un cierto ángulo debido al viento.

- Pasar de una parcela sin árbol a una parcela protegida por un árbol hace disminuir mucho el coeficiente aplicable a las variables $I5^2$ y $I60^2$ para explicar la erosión. Efectivamente, en ambos casos la protección del árbol es obvia tanto a corto plazo como al cabo de una hora: aunque las gotas crucen el follaje del árbol (lo que puede ocurrir antes de los cinco minutos de precipitación), su energía cinética es fuertemente disminuida en las hojas del árbol.

Parcelas de 40 m².

Escurrimiento.

En las parcelas de 40 m², las condiciones son demasiado diferentes entre ellas para que se hayan podido determinar ecuaciones utilizando las mismas variables. Sin embargo, en cada parcela, la primer variable explicativa del escurrimiento fue la intensidad máxima en 20 minutos, en dos casos asociada al índice de Kolher:

$$\text{EscB0}^{0.5} = 0.00213*(I20*IK3) + 0.011*U04 + 0.013*IK1 - 0.65 \quad (R^2 = 0.82)$$

$$\text{EscB1}^{0.5} = 0.00202*(I20*IK3) + 0.0075*U16 + 0.0027*P - 0.32 \quad (R^2 = 0.89)$$

$$\text{EscB2}^{0.5} = 0.0247*I20 + 0.0016*P - 0.25 \quad (R^2 = 0.4)$$

Se puede observar que el papel de la vegetación y de la hojarasca aparece en estos parámetros. En la parcela B0, que tiene una vegetación herbácea degradada, el estado preliminar del suelo es determinante para el escurrimiento: la variable I20 entra multiplicada por un índice de Kolher, y además en la ecuación entra otra vez un índice de Kolher; como hay poca vegetación y no hay protección de un mantillo, el suelo está desnudo en algunas partes, en otras poco cubierto; su estado de humedad antes de la precipitación será entonces primordial. Se nota también que el otro factor importante, la lluvia útil, es la que tiene intensidad superior a 4 mm/h, y donde empieza el escurrimiento.

En la parcela B1, que sigue protegida por la hojarasca de los árboles que se cortaron en 1995, también influye el índice de Kolher, multiplicado con la I20. Pero la lluvia útil que entra como segunda variable es con un rango de 16 mm/h, lo que significa que el escurrimiento es importante a partir de este rango. También entra como tercer variable P, la precipitación total.

La parcela B2 está completamente ubicada debajo de unos árboles, y además, tiene un mantillo muy espeso. Esta protección provoca que el estado del suelo no influya sobre el escurrimiento (no entra el IK como variable explicativa). Pero sí entran la intensidad máxima en 20 minutos y la precipitación total. Se nota que el coeficiente de determinación es muy débil debido a la buena protección vegetal de la parcela: la lluvia sí provoca escurrimiento, pero con muy fuertes pérdidas.

Erosión.

Para la erosión también la primera variable explicativa es la I20:

$$\text{EBC} = 19.1*I20 - 69.9 \quad (R^2 = 0.8)$$

$$\text{EB1} = 0.173*(I20)^2 - 5.675 \quad (R^2 = 0.86)$$

$$\text{EB2} = 0.0049*(I20)^2 - 0.37 \quad (R^2 = 0.56)$$

En este caso sí se pudieron comparar las tres parcelas pues tuvieron como única variable la intensidad máxima durante 20 minutos (I20), sólo que en las parcelas B1 y B2 (las que tienen mantillo) está al cuadrado, pues la protección selecciona las lluvias que puedan producir escurrimiento. Los coeficientes multiplicativos de I20 disminuyen rápidamente con la presencia de protección vegetal. Aquí también la parcela B2 tiene una correlación muy tenue entre intensidad de la precipitación y la erosión, debido a los débiles valores de ésta.

VARIABLES ESPACIALES: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARCELAS.

Con la presencia de muchas microparcelsas se pudieron evidenciar los elementos espaciales y permanentes (es decir no dependientes de eventos climáticos, sino de las condiciones del medio). Para evidenciar las variables que influyen sobre el escurrimiento (ESC) y la erosión (ERO), se tomaron en cuenta los parámetros físicos siguientes:

- Pendiente (PEN).
- Cobertura vegetal (CVG).
- Pedregosidad (gravas inferiores a 2cm) (PED), que en realidad son una prueba de erosión: se van los elementos finos con el agua y se quedan las gravas, acompañadas de una costra de erosión.
- Impermeabilidad (IMP) medida en tiempo de infiltración de cierta cantidad de agua.
- Tasa de cobertura del mantillo (TCM).
- Espesor del mantillo (ESM).
- Porcentaje de arena (ARE), arcilla (ARC) y materia orgánica (MOR) en el suelo.
- Densidad aparente del suelo (DEN).

Se juntaron con el total de los escurrimientos y de la erosión anuales por parcela y se realizó una matriz de correlación (Cuadro 10):

CUADRO 10. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE LA EROSIÓN Y DEL ESCURRIMIENTO CON LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO EN ZONA DE BOSQUE.

VAR	ESC	ERO	PEN	CVG	PED	IMP	ESM	TCM	ARE	ARC	MOR	DEN
ESC	1											
ERO	0.85	1										
PEN	-0.13	0.08	1									
CVG	-0.35	-0.47	-0.61	1								
PED	0.87	0.97	-0.01	-0.45	1							
IMP	0.85	0.80	-0.22	-0.22	0.78	1						
ESM	-0.25	-0.26	0.63	-0.18	-0.29	-0.33	1					
TCM	-0.60	-0.63	0.19	0.09	-0.64	-0.54	0.54	1				
ARE	0.10	0.35	0.05	-0.01	0.37	0.24	-0.08	-0.12	1			
ARC	0.23	-0.08	-0.29	0.01	-0.03	-0.06	-0.21	-0.34	-0.76	1		
MOR	-0.55	-0.48	0.24	0.1	-0.54	-0.41	0.37	0.79	0.02	-0.41	1	
DEN	0.15	0.15	-0.53	0.59	0.17	0.17	-0.34	-0.16	0.15	0.08	-0.19	1

(en Guedez, 1996)

Se puede observar en este cuadro que las principales características que provocan el escurrimiento y la erosión son la pedregosidad y la impermeabilidad del suelo. Es ambiguo el papel de la pedregosidad, pues se considera que es la que crea una rugosidad que frena el escurrimiento y la erosión. Pero en este caso, la pedregosidad es debida a la presencia de gravas (de diámetro inferior a 2 cm) que son elementos incluidos en el suelo y que son liberados por la erosión, así mismo se nota que la pedregosidad está correlacionada con la impermeabilidad, lo que confirma que estas gravas son testigo de la presencia de una costra de erosión muy impermeable, y

que no juegan el mismo papel que las piedras (en general de diámetro superior a 2 cm), que sí protegen eficazmente el suelo contra el escurrimiento y la erosión.

La tasa de cobertura de mantillo y el porcentaje de materia orgánica son las variables secundarias explicativas de la erosión y el escurrimiento, claro con un coeficiente negativo, pues disminuyen estas variables dependientes cuando aumentan la protección del mantillo y la materia orgánica.

Al contrario, se puede notar que la pendiente y el espesor del mantillo no juegan ningún papel en la erosión y el escurrimiento (basta con su presencia para amortiguar la energía cinética de las gotas). Los componentes del suelo (aparte de la materia orgánica) no tienen un papel definido.

Con un ACP (análisis de componentes principales) se pueden agrupar las variables para simplificar la explicación de la erosión y el escurrimiento. Los tres primeros ejes del ACP explican más del 80 por ciento de la varianza total, tal como se muestra en el Cuadro 11:

CUADRO 11. PESO DE LOS TRES PRIMEROS COMPONENTES.

Componente principal	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Varianza en los ejes principales	6.15	2.54	2.01
Porcentaje de la varianza explicada	47.3	19.5	15.4

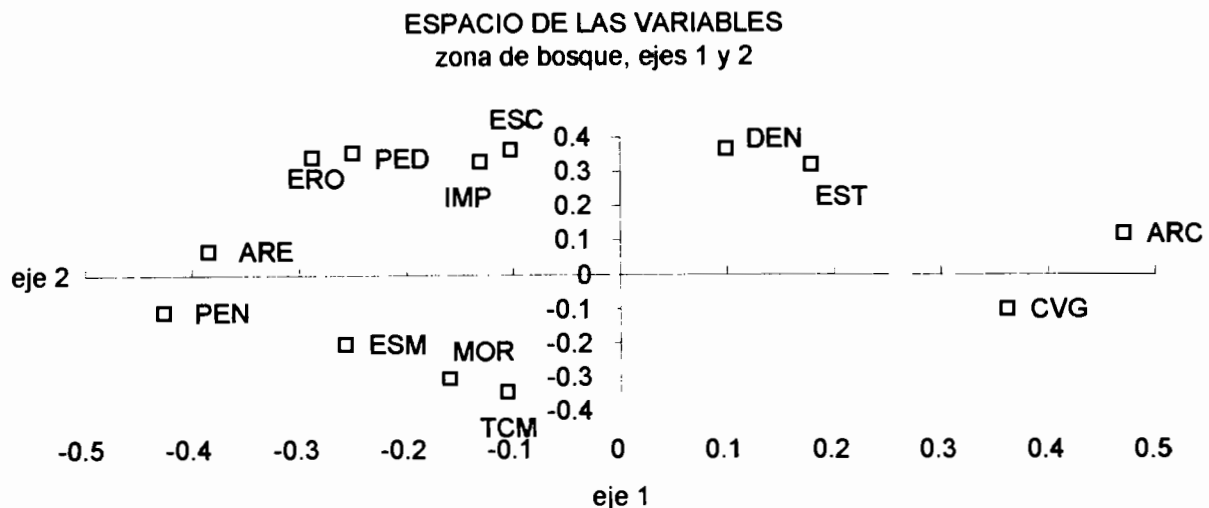


Figura 11. Espacio de las variables, ejes 1 y 2.

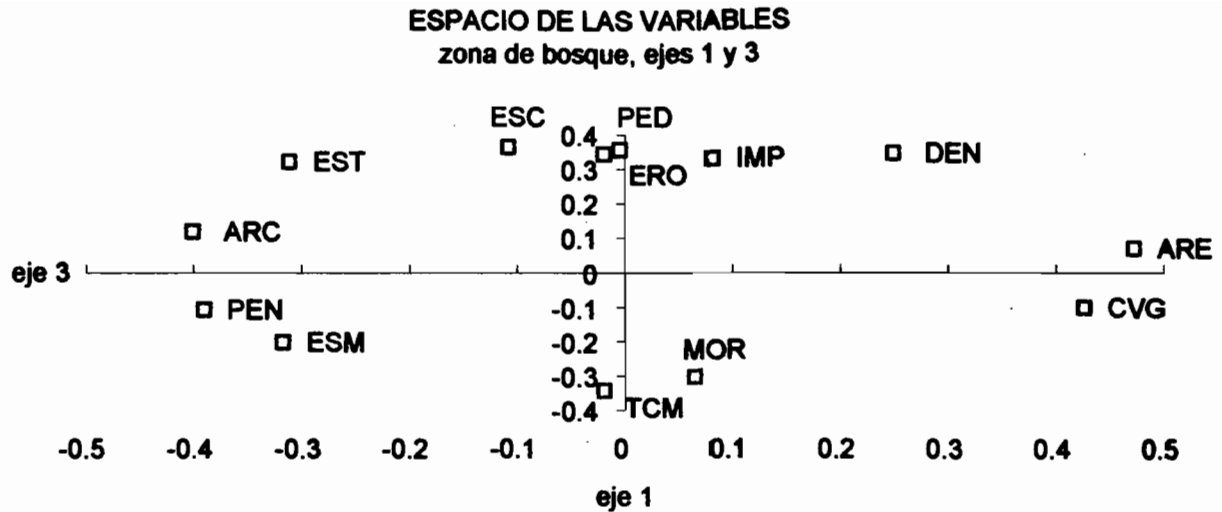


Figura 12. Espacio de las variables: ejes 1 y 3

En las Figuras 11 y 12 se nota el papel principal del eje 1, determinado por la erosión, el escurrimiento, la pedregosidad y la impermeabilidad del suelo (con correlación positiva, es decir, que creciendo la impermeabilidad y la pedregosidad, crecen las variables dependientes), y por otra parte la presencia de materia orgánica y la tasa de cobertura de la hojarasca, pero ambas con correlación negativa, siendo evidente que son factores que disminuyen la erosión y el escurrimiento.

El eje 2 está determinado por la cobertura vegetal que se opone a la pendiente y la proporción de arena: estos dos elementos están obviamente ligados debido a que cuando aumenta la pendiente, los elementos finos (arcilla y limo) son los primeros que se transportan quedando en su lugar la arena; se oponen a la cobertura vegetal más densa cuando la pendiente es débil; el eje 3 también está determinado por la cobertura vegetal y la pendiente.

Para terminar, cabe notar que en las parcelas de medición de flujo por los tallos (conocidas como parcelas de « stem-flow² »), destinadas a medir la captación de agua de lluvias por los árboles, se obtuvieron unos porcentajes muy bajos de captación en esta zona de bosque: apenas 3.8 por ciento en el árbol que más captó agua en su tronco. Además del tipo de árbol, fue su posición en la vertiente lo que influyó en este porcentaje: menos de 0.3 por ciento para árboles ubicados en pendientes fuertes (25°), más de 3 por ciento en pendientes débiles (7°). Esto parece deberse únicamente a la posición del árbol en relación con el viento y la dirección que tienen las gotas de agua al momento de caer en el árbol. Las diferencias entre pino y encino fueron muy débiles, aunque en los dos casos de pendientes diferentes la captación por el pino fue superior a la del encino (superior de 10 por ciento en pendiente débil, y de 60 por ciento en pendiente fuerte).

C- EN ZONA DE SABANA

Aquí llamaremos zona de sabana a toda la zona de pastizales, sabanas y bosques claros que constituyen la parte « útil » de los territorios ejidales. De hecho, la explotación forestal casi no

² stem-flow: flujo por los tallos y por extensión, sistema de medición de este flujo.

influye en la vida de los pueblos, es casi un mundo aparte, que explotan los forestales de Tepehuanes, dejando únicamente el pago de lo que se corta.

De 2 400 metros de altitud para abajo, el bosque se transforma poco a poco en sabana arbórea, a veces desmontada para cultivos o para ampliar los pastizales. Esta zona es la que circunda los lugares poblados, rodeados por las zonas cultivadas.

La sabana es, de 1 900 a 2 300 metros, una sabana de encinos (con tres familias de encinos, y a lo menos unas veinte especies diferentes). Siendo árboles de tamaño pequeño (raras veces pasan de los diez metros a esta altitud), protegen bastante bien el suelo, cuando el pasto es demasiado escaso para hacerlo, como ocurre en años secos. Las ramas bajas están a 2 ó 3 metros del suelo, y las gotas de agua no alcanzan, al caer del árbol, una energía cinética suficiente para desmoronar los agregados del suelo.

Como se verá en el Capítulo 4, esta zona está sobreexplotada desde hace varias décadas, y el medio padece los impactos del sobrepastoreo. El dispositivo de medición incluye:

- 4 microparcels (0.5 m²).
- 10 parcelas de 50 m², microcuencas.
- 2 microcuencas equipadas de trampas para sedimentos.

- Diversos instrumentos localizados (Figura 3) para estimar valores de erosión lineal (rugosímetro o « regla topográfica ») o de transportes sólidos (botellas-sifón), de captación por los árboles (parcelas de medición de flujo por los tallos, dichas « stem-flow »), de escurrimiento en microvaguadas (escalas de máximos).

Los resultados obtenidos en las parcelas de 50 m² están resumidos en los Cuadros 12 a 15.

CUADRO 12. CARACTERÍSTICAS DE LAS PARCELAS.

Nº parcela	Pendiente %	Superficie m ²	Vegetación en %	Litología
11	25.7	51.5	76	conglomerados
12	17.1	47.6	68	conglomerados
13	16.2	47.4	22	conglomerados
14	28.8	53.5	22	conglomerados
15	12.8	62.1	44	conglomerados
21	16.6	53.6	84	ignimbritas
22	17.8	49	64	ignimbritas
23	31.4	49.9	68	ignimbritas
24	34.3	51.2	49	ignimbritas
25	23.3	60.3	48	ignimbritas

CUADRO 13. ESCURRIMIENTOS MEDIDOS EN ZONA DE SABANA.

Manga (conglomerados)					
P 1996 = 365.4 mm	parc. 11	parc. 12	parc. 13	parc. 14	parc. 15
Lámina escurrida en mm	68.57	85.05	125.14	99.34	65.84
Coefficiente K en %	18.77	23.28	34.25	27.2	18.02
Aguaje (ignimbritas)					
P 1996 = 585.5 mm	parc. 21	parc. 22	parc. 23	parc. 24	parc. 25
Lámina escurrida en mm	66.67	330.55	122.17	100.98	118.25
Coefficiente K en %	11.39	56.46	20.87	17.25	20.2

CUADRO 14. EROSIÓN MEDIDA EN ZONA DE SABANA.

Manga (conglomerados)	Parcela 11	Parcela 12	Parcela 13	Parcela 14	Parcela 15
P. total en parcela en Kgs	94.91	58.89	219.2	176.96	81.08
en ton.ha ⁻¹	18.42	12.36	46.24	33.05	13.35
Aguaje (ignimbritas)	parc. 21	parc. 22	parc. 23	parc. 24	parc. 25
P. total en parcela en Kgs	100.37	453.42	266.14	49.18	63.99
en ton.ha ⁻¹	18.71	92.5	53.32	9.6	10.62

CUADRO 15. ESCURRIMIENTO Y EROSIÓN, SEGÚN CATEGORÍAS DE MEDIOS.

1996	Igni.	Conglo	P.con árbol	P.sin árbol	P.clausurada	P.débil	P.fte.
Coefficiente K (%)	25.28	24.35	19	34	19	31	21
Erosión en ton.ha ⁻¹	37	25	26	45	12	42	29

De estos cuadros se puede concluir lo siguiente:

- Los coeficientes de escurrimiento son a fin de cuentas bastante elevados, con promedios, a la escala de una parcela de 50 m², de 25 por ciento.

- No es muy diferente con substrato de ignimbritas que con conglomerados.

- Sí importa mucho el tipo de cobertura vegetal: se incrementan de 80 por ciento erosión y escurrimiento cuando el suelo de la sabana no está protegido por los encinos; una parcela sin árbol pero protegida del pastoreo por una cerca está aún mejor protegida de la erosión que la que es pastoreada pero ubicada bajo un árbol, y al nivel de escurrimiento se comporta como en las zonas con árboles.

- La erosión es moderada con promedios de 25 a 37 toneladas por hectárea, lo cual es elevada en absoluto, pero poco para una área de montaña.

- La pendiente juega un papel no claro, puesto que aquí disminuyen erosión y escurrimiento con el incremento de la pendiente. Esto ya se explicó que pudiera ser consecuencia de la disminución de la energía cinética con la pendiente y de la ley de la « inmunidad de las pendientes fuertes », y por el papel mucho más importante que tienen las otras variables.

VARIABLES TEMPORALES.

En parcelas de 50 m² se hicieron mediciones en dos sitios (cinco parcelas en cada sitio), uno de ellos en ignimbritas, el otro en conglomerados. Cabe precisar que como los conglomerados se constituyeron recientemente (al final del terciario o a principios del Cuaternario) en fosas tectónicas encajadas en formaciones ígneas, están esencialmente formados por pedazos de ignimbrita alterada y su cemento también es en parte del mismo origen. En cada sitio se dispusieron las parcelas para tomar en cuenta dos tipos de pendiente y la protección o no de un árbol. También se pudieron aprovechar los sitios cercados que se habían constituido en 1994 para el estudio del sobrepastoreo, y que quedaron más de tres años sin ser pastoreados. En ambos sitios se comparó el comportamiento de las dos parcelas, cuya única diferencia era haber sido o no pastoreada.

Como en el caso de las parcelas de la zona de bosque, se intentaron conservar para cada parcela los mismos parámetros explicativos, pero no siempre fue posible.

Esguurrimiento.

En el sitio de La Manga, constituido por conglomerados, las variables temporales explicativas del esguurrimiento fueron la PU18 (lluvia útil caída con intensidad superior a 18 mm/h) y la I5 (intensidad máxima en 5 minutos).

Las ecuaciones de regresión tuvieron la forma siguiente (ver coeficientes en cuadro 16):

$$\text{Esc} = a \cdot \text{U18} + b \cdot \text{I5} + c$$

donde:

U18 lluvia útil de 18 mm/h, rango a partir del cual empieza teóricamente el esguurrimiento

I5 intensidad máxima de la lluvia en mm/h durante un lapso de cinco minutos

CUADRO 16. COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE ESGUURRIMIENTO EN CONGLOMERADOS POR PARCELA.

Nº parcela	Coef. var. 1: U18	Coef. var. 2: I5	Constante	R ²	Intervalos de aplicación
11	0.091	0.008	0.1	0.93	U18: 0-65; I5: 0-118
12	0.093	0.014	0	0.93	U18: 0-65; I5: 0-118
13	0.100	0.020	0.09	0.92	U18: 0-65; I5: 0-118
14	0.096	0.014	0.15	0.93	U18: 0-65; I5: 0-118
15	0.087	0.006	0.19	0.92	U18: 0-65; I5: 0-118

En el sitio del Aguaje de las Palomas (en ignimbritas), las variables que mejor explicaron la varianza del esguurrimiento fueron la precipitación total (P) multiplicada por un índice de Kolher (IK3, con $\alpha = 0.3$), y la precipitación total (P).

Las ecuaciones de regresión resultaron ser de la forma siguiente (ver coeficientes en el Cuadro 17):

$$\text{Esc} = a \cdot (P \cdot \text{IK3}) + b \cdot P + c$$

CUADRO 17. COEFICIENTES DE LA ECUACION DE ESGUURRIMIENTO EN IGNIMBRITAS POR PARCELA.

Nº parcelas	Coef var 1: P*IK3	Coef var 2: P	Constante	R ²	Intervalos de aplicación
21	0.0028			0.92	P: 1-87 mm; IK3: 1-76
22	0.0093	0.57	-2.92	0.89	P: 1-87 mm; IK3: 1-76
23	0.0048	0.19	-1.17	0.86	P: 1-87 mm; IK3: 1-76
24	0.0044	0.17	-1.06	0.76	P: 1-87 mm; IK3: 1-76
25	0.0057	0.17	-1.32	0.74	P: 1-87 mm; IK3: 1-76

Erosión.

En el sitio de La Manga se pudo correlacionar para cada parcela la erosión con la intensidad máxima en cinco minutos (en mm/h), elevada al cubo (I5³). Las ecuaciones fueron de la forma siguiente (los coeficientes aparecen en el Cuadro 18):

$$E = a \cdot \text{I5}^3 + b$$

CUADRO 18. COEFICIENTES DE LA ECUACION DE EROSION EN CONGLOMERADOS POR PARCELA.

Nº parcela	Coef. de la variable $I5^3$	Constante	R^2	Intervalo de aplicación
11	0.0073	-331	0.81	I5: 0-118 mm/h
12	0.0048	-219	0.84	I5: 0-118 mm/h
13	0.0187	-753	0.79	I5: 0-118 mm/h
14	0.0129	-559	0.88	I5: 0-118 mm/h
15	0.0052	-204	0.76	I5: 0-118 mm/h

Y en el sitio del Aguaje de las Palomas, también se pudo explicar la erosión con una sola variable; aquí la lluvia útil con intensidad arriba de 14 mm/h, elevada al cuadrado. La ecuación tuvo la forma siguiente (los coeficientes por parcela aparecen en el Cuadro 19):

$$E = a \cdot U14^2 + b$$

CUADRO 19. COEFICIENTES DE LA ECUACION DE EROSION EN IGNIMBRITAS POR PARCELA.

Nº parcela	Coef. de la variable $U14^2$	Constante	R^2	Intervalo de aplicación
21	2.15	-6.97	0.86	U14: 0-72.4 mm
22	8.69	499	0.84	U14: 0-72.4 mm
23	5.58	131	0.84	U14: 0-72.4 mm
24	1.00	25.4	0.87	U14: 0-72.4 mm
25	1.29	-22.6	0.92	U14: 0-72.4 mm

VARIABLES ESPACIALES.

Las características del suelo también aquí influyen mucho el escurrimiento y la erosión.

En el caso de las micro-parcelas se pudo averiguar el papel de cada elemento. En el Cuadro 20, se exponen los datos de erosión y escurrimiento en estos dispositivos.

CUADRO 20. EROSIÓN Y ESCURRIMIENTO EN LAS MICROPARCELAS.

Parcelas	Igni.	Congl.	P. debil	P. med.	P. fuerte	Veg> 17%	Veg< 17%	PV	NoP V	Pis	No Pis
Erosión Kg ha-1	434.2	256.4	464.3	89.4	422.9	54.85	490.3	667.6	74.9	897.8	71.93
EscurremK %	16.7	20.78	17.83	8.4	31	8.67	25.2	34.86	6.67	42.6	8.27

(Según Poulenard, 1995; PV = porosidad vesicular; p = pendiente; Pis = pisoteo)

El cuadro anterior muestra lo siguiente:

- La litología influye de manera variable en erosión y escurrimiento: la erosión es más importante en zonas de ignimbritas, contrario al escurrimiento potencial, que es más importante en zonas de conglomerado.

- La pendiente, como se vio también en la zona de bosques, no tiene un papel bien claro: son más importantes la erosión y el escurrimiento en pendientes débiles (de 0 a 11°) que en pendientes medianas (de 12 a 19°), y al contrario se incrementa sustancialmente al pasar de pendientes medianas a fuertes (de 20 a 40°). Como las pendientes medianas eran en zona de

bosques las que producían mayor erosión y escurrimiento, se puede concluir que la pendiente no juega ningún papel determinante en la formación de ambos; es definitivamente un factor secundario.

- La cobertura vegetal sí es un factor determinante: su presencia (densidad superior a 17 por ciento) disminuye muy sensiblemente la erosión (dividiéndola entre nueve y el escurrimiento, dividido entre tres);

- La presencia de porosidad vesicular (PV) aumenta considerablemente la erosión (multiplicada por ocho) y el escurrimiento (multiplicado por cinco por la presencia de esta porosidad). Según Casenave y Valentin (1989), la porosidad de un suelo se debe dividir en porosidad funcional y porosidad no funcional. La primera corresponde a porosidades que se comunican entre sí y permiten incrementar la infiltración. Las porosidades no funcionales son pequeñas cavidades más o menos esféricas que resultan de burbujas de aire encarceladas en los micro-horizontes. Estos autores llaman a este segundo tipo de cavidades « porosidad vesicular », y demostraron que su existencia podía tener una influencia considerable en la infiltración: « *Estas porosidades no funcionales constituyen uno de los elementos primordiales de las descripciones de los estados de superficie (se refieren a los suelos del Sahel). Forman un índice muy bueno de las condiciones desfavorables a la infiltración* ». Este elemento fue tomado en cuenta por Poulénard (1995) y se pudo comprobar que aquí también tenía esta porosidad una importancia muy grande al correlacionarse con el escurrimiento, la erosión y la presencia de pisoteo de ganado.

- En fin, también se puede notar en el cuadro 19 que la presencia de pisoteo de ganado hace incrementar a un factor 12 a la erosión y a un factor 4 el escurrimiento. Definitivamente, el sobrepastoreo daña considerablemente los pastizales de la Sierra Madre y tiene un impacto fuerte sobre el balance hídrico.

CUADRO 21. MATRIZ DE CORRELACION DE LA EROSION Y DEL ESCURRIMIENTO CON LAS CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL SUELO EN ZONA DE SABANA.

VAR	ESC	ERO	PEN	CVG	POR	PIS	PEG	ARC	MOR	CRO	MOA	COE
ESC	1											
ERO	0.84	1										
PEN	0.45	0.07	1									
CVG	-0.75	-0.7	-0.41	1								
POR	0.77	0.66	0.09	-0.56	1							
PIS	0.97	0.86	0.43	-0.74	0.76	1						
PEG	0.17	0.02	0.68	-0.36	-0.16	0.18	1					
ARC	-0.03	-0.12	0.13	-0.12	-0.05	-0.16	0.23	1				
MOR	-0.02	-0.24	0.51	-0.17	-0.08	0.02	0.6	0.44	1			
CRO	-0.02	-0.1	-0.38	-0.06	0.49	-0.02	-0.32	0.16	-0.09	1		
MOA	0.31	0.6	0.09	-0.36	0.15	0.35	0.34	-0.03	0.06	-0.44	1	
COE	0.94	0.72	0.46	-0.61	0.78	0.89	0.04	0.04	0	0.04	0.1	1

(in Poulénard, 1995)

Aquí se tomaron en cuenta para explicar escurrimiento (ESC) y erosión (ERO) los elementos siguientes: pendiente (PEN), cobertura vegetal (CVG), porosidad vesicular del suelo (POR), presencia de pisoteo (PIS), pedregosidad (aquí elementos gruesos, superiores a 5 cm de

diámetro) (PEG), proporción de arcilla (ARC), materia orgánica (MOR), elemento estado de superficie expresado por Ki (coeficiente de infiltración determinado por Casenave y Valentin, 1989) (CRO), razón MOR*100/ARC (MOA) y coeficiente de escurrimiento (COE). Las correlaciones de las características físicas de las parcelas con el escurrimiento y la erosión aparecen en el Cuadro 21.

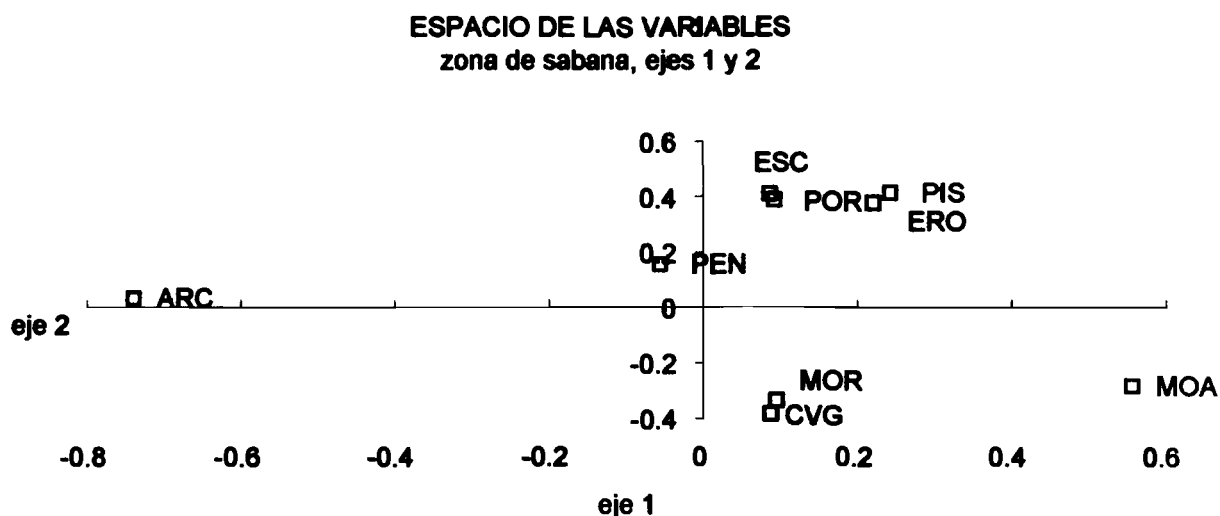


Figura 13. Espacio de las variables, ejes 1 y 2.

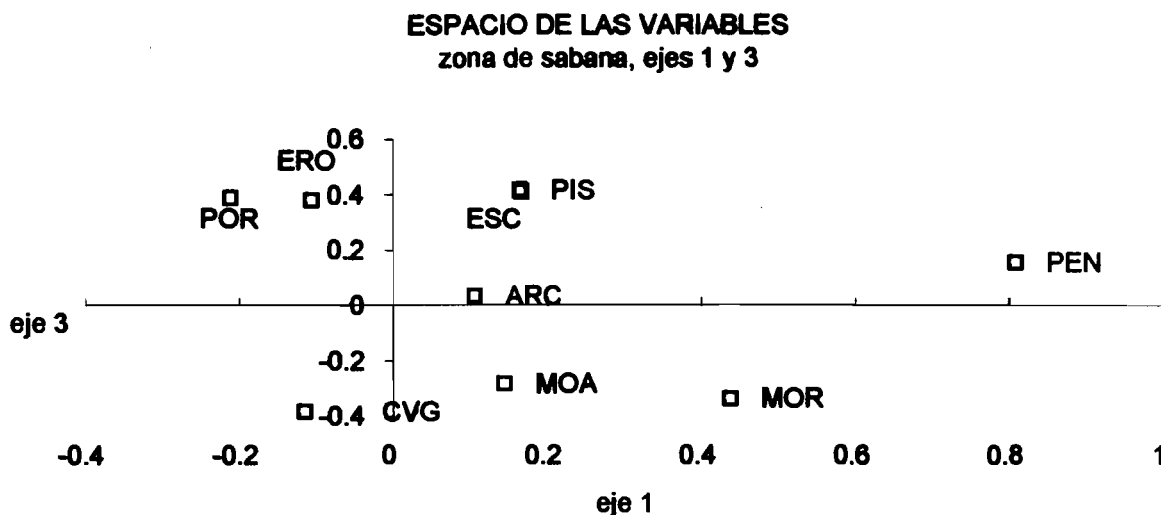


Figura 14. Espacio de las variables: ejes 1 y 3.

CUADRO 22. PESO DE LOS TRES PRIMEROS COMPONENTES.

Componente principal	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Varianza en los ejes principales	4.83	1.55	1.25
Porcentaje de la varianza explicada	53.7	17.2	13.9

Los tres primeros ejes explican el 85 por ciento de la varianza (Cuadro 22). El eje 1 (Figura 13) está determinado por el escurrimiento y la presencia de porosidad vesicular (con correlación positiva), es decir que este elemento es factor explicativo del escurrimiento; al contrario de la cobertura vegetal y el porcentaje de materia orgánica, que lo definen pero con correlación negativa: cuando van creciendo disminuye el escurrimiento. El eje 2 está definido por la proporción de arcilla, que parece oponerse al escurrimiento y a la erosión (por ser prueba de estabilidad del suelo?), y el eje 3 (Figura 14) por la pendiente y la proporción de materia orgánica, que también se oponen al escurrimiento y a la erosión. Esto es normal en cuanto a la materia orgánica pero no en cuanto a la pendiente, que es difícil relacionar con la materia orgánica, ya que en general esta se amontona donde hay menos pendiente.

A nivel de cuencas más grandes se midieron también las tasas de erosión y los coeficientes K de escurrimiento.

En la cuenca La Manga (3 km²) en zona de sabana sobrepastoreada pero sin huellas de erosión lineal, se midieron para un año promedio una erosión de 0.67 ton ha⁻¹ y un coeficiente de escurrimiento de 13 por ciento. Es la única cuenca para la cual se pudo medir la erosión por evento. Esta constituida únicamente de conglomerados. La cuenca Pilitas (de 50 km², 50 por ciento de ignimbritas y 50 por ciento de conglomerados) tiene un coeficiente K de 18 por ciento. En las otras cuencas experimentales, que están constituidas únicamente de ignimbritas, el coeficiente K es de 21 por ciento en El Cura (21 km²), y 27 por ciento en la Esmeralda (1.5 km²).

Al nivel de las cuencas hidrográficas de gran superficie, la erosión se puede estimar con el azolve de la presa El Palmito: se midió por batimetría la sedimentación al fondo de esta presa: el promedio de erosión fue de 5.42 ton ha⁻¹ de 1946 a 1971 y de 5.01 ton ha⁻¹ de 1971 a 1991. Estos valores se aproximan a los que se observan en los Alpes, en zonas más boscosas, pero más erosionadas y con pendientes más fuertes (ejemplo 8.5 ton ha⁻¹ para la cuenca del Río Durance en Serre Ponçon, cuenca de 5 000 km², Descroix, 1994). El coeficiente de escurrimiento promedio en 50 años en la cuenca de Palmito es de 13 por ciento.

Los resultados de captación por los troncos de árboles obtenidos en las parcelas de stem-flow (medición del flujo por los tallos) en área de sabana fueron inferiores a los que se midieron en zona de bosque, con sólo 0.97 por ciento del agua de lluvia caída en el árbol captado por el tronco, y sin que haya diferencias notables entre pinos y encinos, ni entre árboles jóvenes o maduros.

IV. MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LAS CUENCAS.

El conocimiento de las cuencas y de su funcionamiento hidrológico requiere de la modelación de escurrimientos. Lo que se busca es establecer la relación precipitación/ escurrimiento. Esta se hizo en dos pasos; primero se buscó en los parámetros de los eventos « lluvia » las características que explican el escurrimiento, y después se intentó una modelación determinista a partir de un modelo muy simple, para poder prever los escurrimientos de manera sencilla y confiable, y para hacerlos comparables con los de otras regiones.

Las características de las cuencas están indicadas en el Cuadro 23.

CUADRO 23. CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS EXPERIMENTALES.

Cuenca	Superficie km ²	Pendiente promedio	Litología	% bosque	%pastizal
Cura	21.8	6.6%	ignimbritas	43	57
Esmeralda	1.28	13.3%	ignimbritas	66	34
Manga	3.08	4.6%	conglomerados	16	84
Pilitas	52.3	6.1%	30% cong, 70 %ig	43	57
Posta	8.62	8.5%	ignimbritas	56	44

MODELACION CORRELATIVA.

La meta es de modelar la relación precipitación/escorrentía a partir de los elementos del clima que se conocen, particularmente la lluvia y todas sus características. Para poder atribuir a cada avenida de cada cuenca las características de una lluvia o de un conjunto de lluvias se dividieron las avenidas considerando que cuando dos avenidas se siguen en el tiempo, al final de la primera es cuando el gasto alcanza el « gasto básico », es decir el de antes de la lluvia, o a veces un gasto más elevado cuando el hidrograma muestra de manera obvia el final del escurrimiento suplementario debido al evento estudiado.

Para conocer el volumen precipitado en la cuenca se usaron mapas de isoyetas por evento realizado por interpolación (kriging³) con el paquete Surfer. Las características de las lluvias (intensidad, lluvia útil, energía cinética) se calcularon con promedios ponderados de los datos de los captos interesados.

Se correlacionaron los datos de escurrimiento por avenida con las características de la lluvia: precipitación total, lluvia útil (rangos de intensidad teórica a partir del cual empieza a escurrir el agua), intensidad máxima de la lluvia en rangos de tiempo, energía cinética de la lluvia, índice de Kolher (índice teórico de humedad del suelo al principio de la lluvia) con varios valores del coeficiente α ; estos parámetros se elevaron a veces al cuadrado o al cubo, y se multiplicaron en unos casos entre sí.

Se estudiaron todos los eventos de precipitación, pero para modelar los escurrimientos se tomaron en cuenta únicamente los eventos que provocaron una avenida, aunque esta sea de poco volumen.

En una primera etapa se quiso conocer las variables que mejor explicaban la varianza del escurrimiento en las diferentes cuencas. La primer variable explicativa del escurrimiento fue siempre la lluvia útil multiplicada por el índice de Kolher IK1 ($\alpha = 0.1$), pero se notan dos diferencias importantes entre cuencas:

- La primera es que la lluvia útil no es la misma para todas las cuencas.
- La segunda es que la segunda variable explicativa no es la misma en las diferentes cuencas.

Las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas fueron las siguientes:

Cuenca El Cura

$$\text{Esc} = 0.00042*(\text{PU}2*\text{IK}1) + 0.039*\text{P} - 0.47$$

$$(R^2 = 0.76)$$

³ kriging: método matemático de interpolación numérica.

Cuenca Esmeralda

$$\text{Esc} = 0.00081*(\text{PU2}*\text{IK1}) + 0.030*\text{P} + 0.1 \quad (\text{R}^2 = 0.61)$$

Cuenca La Manga

$$\text{Esc} = 0.00139*(\text{PU6}*\text{IK1}) + 0.006*\text{IK1} - 0.26 \quad (\text{R}^2 = 0.80)$$

Cuenca Pilitas

$$\text{Esc} = 0.00053*(\text{PU2}*\text{IK1}) + 0.044*\text{P} + 0.17 \quad (\text{R}^2 = 0.52)$$

El papel de la lluvia útil multiplicada por el índice de Kolher se explica por la gran importancia que tiene aquí la humedad del suelo al momento del comienzo de la lluvia. La presencia en segundo lugar de la precipitación total (valor muy cercano de PU2, pues se puede suponer que la mayor parte de la lluvia cae con intensidad superior a 2 mm/h) indica que con poca intensidad las lluvias empiezan a escurrir; esto se debe al carácter impermeable de la roca madre (ignimbritas y riolitas).

La cuenca cuyo comportamiento se aleja de las demás es la de La Manga. Esto se puede explicar por el hecho que esté completamente constituida de conglomerados. El que la lluvia útil sea de 6 mm/h indica que se requiere una intensidad más fuerte para que empiece el escurrimiento. Esto se confirma dado la otra cuenca que tiene conglomerados (la de Pilitas, 30 por ciento aproximadamente) tuvo como siguiente coeficiente de correlación en la matriz los PU4, PU6 y PU8, lo que no se produjo en las cuencas constituidas de rocas ígneas (Cura y Esmeralda); esto se debe a que en la parte de conglomerados la lluvia útil es más elevada.

En la cuenca La Manga se nota también que la segunda variable no es la precipitación total sino el índice de Kolher, que ya aparecía en la primera variable; esto significa que el estado preliminar del suelo es aún más importante en esta cuenca que en las otras.

En una segunda etapa se escogieron variables comunes para poder comparar las cuencas. La primer variable común fue la lluvia total elevada al cuadrado y multiplicada por el índice de Kolher ($\text{P}^2*\text{IK1}$). Las ecuaciones de escurrimiento se escriben a continuación (los coeficientes aparecen en el Cuadro 24):

$$\text{Esc} = a*(\text{P}^2*\text{IK1}) + b$$

CUADRO 24. COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE ESCURRIMIENTO POR CUENCA.

Cuenca	Coef. variable 1 ($\text{P}^2*\text{IK1}$)	Constante	R^2	Intervalo de aplicación
Cura	0.000061	0.158	0.63	P: 1-38 mm; IK1: 12-152
Esmeralda	0.000066	-0.129	0.67	P: 1-45 mm; IK1: 30-152
Manga	0.000094	-0.079	0.91	P: 0-45 mm; IK1: 1-105
Pilitas	0.000039	0.172	0.49	P: 3-37 mm; IK1: 15-118

Se nota que en los dos casos la cuenca de la Manga tiene los mayores coeficientes multiplicadores de la variable. Sin embargo, es la cuenca que tiene el menor coeficiente de escurrimiento (Cuadro 25), y se ve que también es la que requiere mayor lluvia útil para provocar escurrimientos.

CUADRO 25. COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO POR CUENCA Y POR AÑO.

Cuenca	LE 1995 mm	LE 1996 mm	CE 1995 %	CE 1996 %	Número de avenidas en 1996
Cura	7.36	133.3	2.62	20.7	48
Esmeralda	1.8	174.2	0.72	26.7	30
Manga	0.5	64.15	0.25	13.1	23
Pilitas	1.84	97.5	0.57	18.2	34

LE: Lámina escurrida.

CE: Coeficiente de escurrimiento.

MODELACION DETERMINISTA.

Se usará aquí un modelo global, general y sencillo, para determinar la relación precipitación/escorrentía.

1- Se supone que la relación

$$\sqrt{Lr} = f(P)$$

donde *Lr* lámina escurrida

P Precipitación que provocó el escurrimiento *Lr*

es lineal, pero hay que tomar en cuenta las condiciones preliminares y la propensión de la cuenca a escurrir. Si P_0 es la lluvia límite que en condiciones dadas (humedad del suelo, cobertura vegetal, etc.) es el tope inferior abajo del cual no hay escurrimiento. Entonces:

$$\sqrt{Lr} = K*(P - P_0)$$

donde *K* es un coeficiente multiplicador que varía según la permeabilidad superficial de los suelos, y la superficie de la cuenca vertiente.

2- Para estimar P_0 se considera que la cuenca contiene un tanque de agua (aquí el suelo y su vegetación), y que este tanque tiene que llenarse antes de que escurra agua (desbordamiento del tanque). Se estima P_0 con la fórmula siguiente:

$$P_0 = C*(H_{max} - IP)$$

donde H_{max} capacidad máxima del tanque (suelo + vegetación)

IP nivel del agua en el tanque a un momento dado (Figura 15)

C coeficiente que toma en cuenta la heterogeneidad de la cuenca, y probablemente la intensidad de las lluvias.

Quando el tanque suelo-vegetación (Figura 15) se llena, P_0 tiende hacia 0.

3- Parece que el coeficiente *K* no varía mucho con P_0 . Pero si *K* varía con P_0 , se tendrá:

$$K_{max} \text{ para } P_{0 \min}$$

$$K_{min} \text{ para } P_{0 \max}$$

K_{max} y K_{min} , $P_{0 \max}$ y $P_{0 \min}$, respectivamente los valores máximos y mínimos de *K* y de P_0 . Entre $P_{0 \min}$ y $P_{0 \max}$, se realiza una interpolación lineal para los otros valores de *K* (Figura 16).

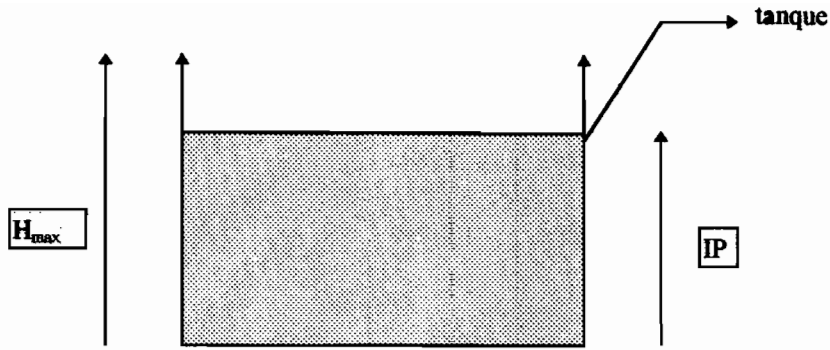


Figura 15. El tanque suelo-vegetación.

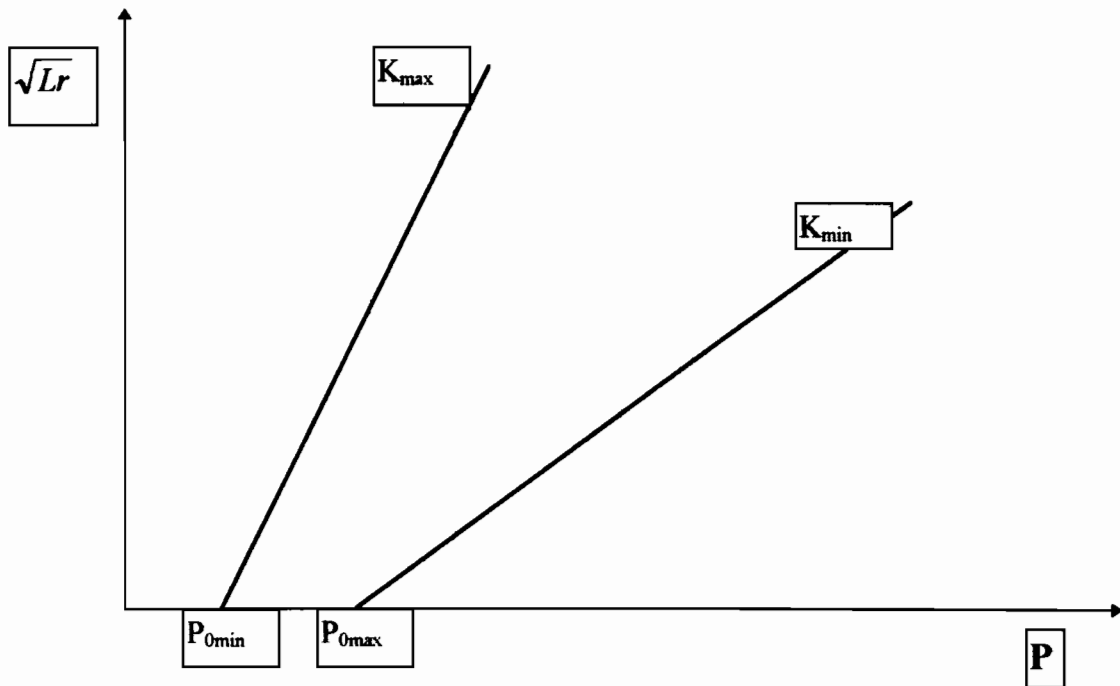


Figura 16. Relación entre el coeficiente K y P_0 .

Entonces:

$$K_n = K_{\min} + [(K_{\max} - K_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min})] * (P_{\max} - P_{0n})$$

4- IP se calcula con la fórmula del índice de precipitaciones anteriores de Kolher:

$$I_{p_n} = (I_{p_{n-1}} + P_{n-1}) * e^{-\alpha t}$$

Resultados de la modelación.

Los valores de los parámetros de modelación para cada cuenca Figuran en el Cuadro 26, y las gráficas se presentan en el anexo 1.

CUADRO 26. PARÁMETROS DE LA MODELACIÓN GLOBAL PARA CADA CUENCA.

Cuenca	H _{max}	P _{max}	P _{min}	K _{max}	K _{min}	α	C
Cura	111	18.7	0	0.147	0.110	0.054	0.32
Esmeralda	169	16.15	0	0.346	0.060	0.083	0.074
Manga	195	17	0	0.150	0.02	0.005	0.12
Pilitas	100	6.07	0	0.182	0.027	0.130	0.075

V. EVOLUCIÓN ESTADÍSTICA DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL NAZAS.

La variabilidad de las aportaciones de agua de una cuenca vertiente suele ser mayor (y a veces con mucha diferencia) a la variabilidad de la pluviometría. Estrada (1995) comprobó que para cuencas de varios miles de km² en la Sierra Madre Occidental no se produce ningún escurrimiento si no se han precipitado por lo menos 100 mm, lo que puede representar la tercera parte de la pluviometría de la temporada de lluvias (Nouvelot *et al.*, 1996). Esto explica por qué cuando el coeficiente de variación (C_v) medio de la pluviometría anual en la Sierra es de 0.23, el C_v de las aportaciones anuales en la presa El Palmito es de 0.67. Como consecuencia de esto, la capacidad máxima de almacenamiento de la presa El Palmito ($4 \cdot 10^9 \text{m}^3$) sólo fue alcanzada dos veces en sus 50 años de existencia (1968 y 1991) (Figura 17).

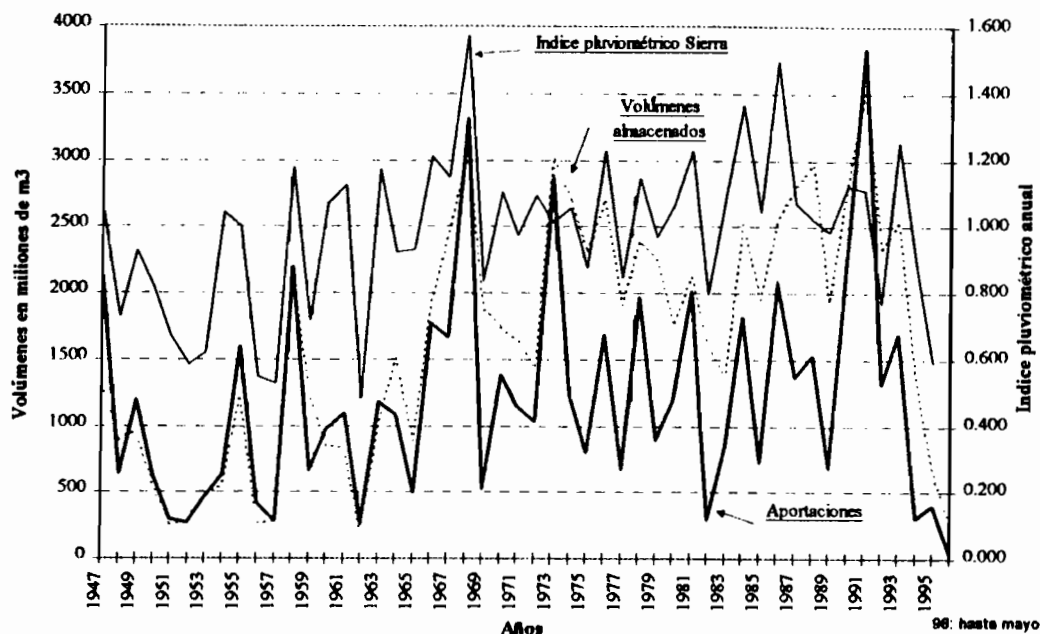


Figura 17. Aportaciones y volúmenes almacenados en la presa El Palmito.

Sin embargo, no se notó ninguna ruptura significativa en la evolución de las aportaciones a la presa desde su inauguración en 1946. Según cierto modo de referencia (método Hubert), se pueden notar tres periodos diferentes:

- de 1947 a 1989: aportación de $1\,161 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$
- de 1990 a 1991: aportación de $3\,073 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$
- de 1992 a 1996: aportación de $978 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

Parece que hay una ruptura en 1965 (según método de Pettitt), pero ésta también se nota en las lluvias (Descroix *et al*, 1997).

No se pueden relacionar estas rupturas con el desmonte o con algún tipo de degradación del medio que hubiera ocasionado una evolución en las condiciones de escurrimiento y erosión.

El período seco de 1994 y 1995 fue resentido de manera más dramática que las avenidas fuertes de 1991-1992. Pero situaciones mucho más problemáticas se han producido en los años 50, cuando a aportaciones débiles se sumaba una demanda superior debido a las pérdidas de conducción ($2.8 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ entonces, $2.2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ hoy día). de 1950 a 1954, durante cinco años consecutivos, el promedio anual de las aportaciones fue de 450 millones de m^3 (en lugar de 1 200 en 50 años). Además, de 1948 a 1965, estas aportaciones sólo dos veces fueron mayores al promedio anual (en 1955 y 1958). El análisis estadístico muestra que aportaciones como las de 1995 tienen una frecuencia de 0.10, o sea, un período de retorno de diez años; la pluviometría del año 1994, más seco, tiene un período de retorno de 21 años. Sin embargo, se nota una fuerte sequía tomando en cuenta los dos años seguidos (menos de 350 millones de m^3 cada año), pues las aportaciones del conjunto de los dos años tienen un período de retorno de 45 años. En junio de 1996, es decir antes de que empiece la temporada de lluvias, el nivel de la presa El Palmito era comparable al que tuvo a final de los años 1951, 1952, 1956, 1957 y 1962, año que terminó con un volumen almacenado de sólo 194 millones de m^3 .

La aportación mínima a la presa desde su inauguración fue la del año 1962, con 232 millones de m^3 , y la máxima la de 1968, con 3315 millones de m^3 . Entre los C_v de las precipitaciones (0.23) y de las aportaciones (0.67) se ubica el de los coeficientes anuales de escurrimiento (razón de las aportaciones por las precipitaciones) que es de 0.46.

El coeficiente medio de escurrimiento para toda la cuenca alta del Nazas ($19\,070 \text{ km}^2$) es de 0.13 (Figura 18) en promedio (lo que significa que 13 por ciento de las aguas precipitadas se escurren fuera de la cuenca). Pero es de 0.15 en la subcuenca Salomé Acosta ($7\,300 \text{ km}^2$; estación de aforo en el río Ramos, en la unión de los ríos Tepehuanes y Santiago) y de 0.19 en la subcuenca Sardinias ($4\,700 \text{ km}^2$; estación en el río Sextin o del Oro, que tiene como principal afluente el río Matalotes). En la Figura 17 se aprecian los valores de K según las subcuencas de la RH 36.

La parte alta de la cuenca del Nazas ubicada aguas abajo de las estaciones de aforo mencionadas se tiene un coeficiente de escurrimiento K menor que las otras subcuencas, ya que está ubicada en contacto con la zona semiárida: su K es de 0.07, la altitud media de 1 800 metros, y la precipitación media anual inferior a 500 mm.

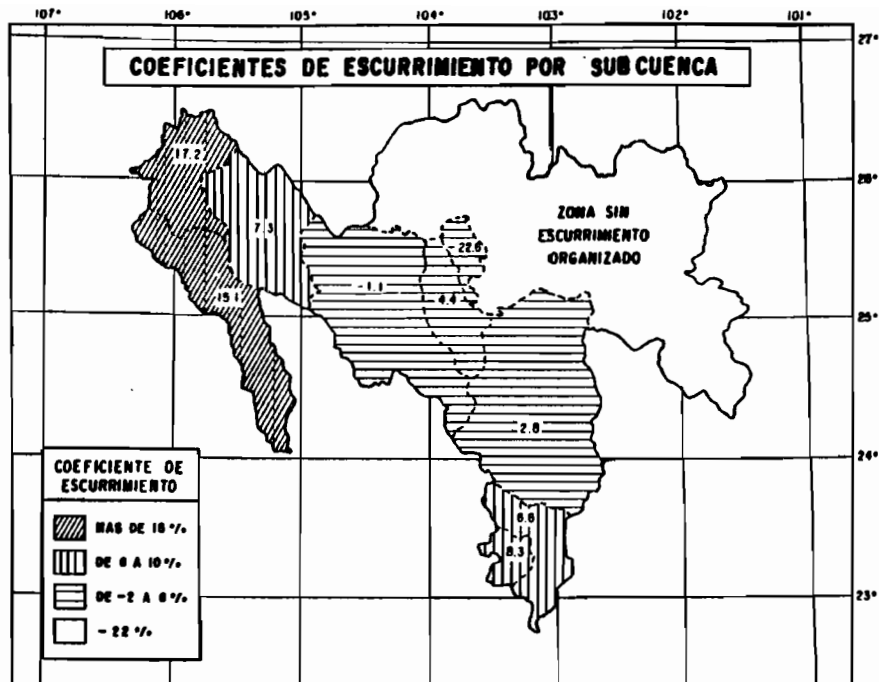


Figura 18. Coeficiente de escurrimiento por subcuencas de la RH 36.

VI. IMPACTO DEL SOBREPASTOREO Y DEL DESMONTE.

EL SOBREPASTOREO Y LA EVOLUCIÓN DEL MEDIO.

El estudio del pastoreo en las cuencas experimentales de la Sierra Madre se hizo (Barral *et al*, 1994) en tres ejidos (La Posta de Jihuites; Boleras, Pilitas, Pitorreal; Escobar y Anexos) y en una comunidad (La Ciénega de Escobar).

Para estimar la carga ganadera de los pastizales se censó el ganado y se comparó con las superficies de pastoreo. También se hicieron mediciones de las reservas de pasto en los pastizales, mediante muestreos y se pesaron las materias secas en varios lugares para estimar la densidad del pasto. Para poder comparar la carga ganadera en varios lugares se usó la unidad de UB (unidad bovina) y de la superficie de pastoreo disponible para la misma. Se pudo así estimar que el volumen de pasto disponible era bastante poco: apenas 723 kg ha^{-1} en promedio (pero se midieron valores de 130 a $2\ 070 \text{ kg ha}^{-1}$).

Una vaca (o UB) consume diariamente el equivalente al tres por ciento de su peso en materia seca. O sea, que para un animal de 450 kg (lo que es más o menos el promedio de una UB en esta zona), el consumo diario es de 13.5 kg , o sea, $4\ 927 \text{ kg/año}$. Cabe considerar también que en México, una vaca consume máximo 50 por ciento de la materia seca disponible. Conociendo estos datos se puede estimar que en estos ejidos, la carga de pastoreo deseable teórica es de 13.6 ha por UB (pero es de 10.5 ha por UB en La Posta de Jihuites y de 19.4 ha por UB en Boleras).

De hecho, la carga es mucho más elevada. La Posta, que dispone de 4 500 hectáreas de pastizales, tiene 2 000 UB, o sea una carga de 2.25 ha por UB (en vez de los 10.5 deseables). El ejido Boleras, que dispone de 15 800 hectáreas de pastizales tiene 4 000 vacas o sea, una carga de 3.95 ha por UB, en vez de una carga deseable de 19.4 ha por UB. En el promedio de esta zona, la carga real es cuatro veces superior a la carga deseable teórica. Además, esto refleja sólo un estado teórico, pero es obvio que la carga no está homogéneamente repartida porque hay más carga cerca de los abrevaderos y de los lugares poblados, así que el sobrepastoreo es aún más agudo en estas partes.

*** Causas del sobrepastoreo.**

Este hecho se debe a varios factores, entre otros:

- El manejo del ganado. El elemento explicativo principal podría ser la ultra-especialización de la ganadería extensiva que se ve en esta región. Este sistema es en muchos casos la única actividad de las poblaciones rurales. Según Cochet (1993): « *la división regional del trabajo y la «sabanización» del ecosistema hacen poco a poco de la ganadería extensiva la única actividad que quede rentable, que permita al productor mantener la remuneración del trabajo* ». Además esta actividad aquí es principalmente una ganadería de producción vaca-becerro: los becerros se venden justo después de la temporada de lluvias; la consecuencia es que durante la temporada de lluvias, la carga pastoral es máxima. Los rendimientos son bajos y para sacar remuneración de la ganadería se debe tener un gran número de UB. El ganado tradicionalmente usado era rústico, pero se están introduciendo razas seleccionadas (Charolais, Brahman, Hereford, etc.), pero éstas no están adaptadas a este tipo de ganadería, siendo razas poco caminadoras, no se alejan de los abrevaderos y aumentan el sobrepastoreo. Esto introduce la segunda explicación.

- El manejo del espacio. El sistema ejidal permitía la existencia de agostaderos que eran de uso colectivo; en Boleras, aparte de los sitios cultivados, los pastizales eran en mayoría colectivos. Pero a pesar de que la constitución del ejido es reciente (finales de los sesenta), el incremento del nivel de vida (debido esencialmente a la emigración y al dinero ganado en Estados Unidos) aumentó el individualismo, y el manejo de las partes colectivas se hizo cada vez más difícil. Además se desarrolló la competencia por las tierras abandonadas por los emigrados. Se agudizó aún más este problema cuando se vislumbró la perspectiva de la privatización de las tierras, donde el ocupante real podría pretenderse dueño de ella.

- El último elemento de explicación es cultural, y se debe a la tradición ganadera y al afecto de la población para su actividad y todo el folklore que lo rodea. Es difícil imaginar otra actividad (aparte de la fruticultura, pocas podrían proporcionar el mismo nivel de vida), y de hecho, es difícil cambiar las cosas.

*** Consecuencias del sobrepastoreo.**

1- **Cambios en la vegetación:** Según Viramontes (1995), « *actualmente existe en esta zona un cambio de lo que fue una área de pastizal natural con árboles alternados (de tipo sabana), por una área de bosque de encino y pino. No obstante, la pérdida de la superficie del suelo es evidente, por lo que la potencialidad productiva del área se está perdiendo. Esto además ha traído consecuencias hidrológicas pues es probable que los escurrimientos superficiales hayan aumentado y la infiltración haya disminuido* ». Según este autor, la evolución actual sería la

expuesta en la Figura 2, que es una evolución clásica de los pastizales debida al sobrepastoreo. Para apoyar esta hipótesis, cabe notar que:

- El número de árboles en las zonas de pastizales aumentó mucho en los últimos veinte años. Se hicieron conteos en las fotografías aéreas de 1974 y se comparó con lo actual en cuatro sitios piloto (Cuadro 27).

- La única actividad económica es la ganadería de agostadero.

- Las zonas de mayor erosión se presentan en áreas con árboles pequeños y no en áreas de pastizal, lo que señala que el estado natural del ecosistema de esta zona no es el bosque.

- Varios autores, entre ellos Gentry (1957) y Rzedowski (1978), señalan la siguiente situación: en zonas de pastizal sujetas a la sobreexplotación existe una tendencia al aumento de especies leñosas y disminución de las especies herbáceas propias del pastizal.

CUADRO 27. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE ÁRBOLES EN CUATRO SITIOS DE PASTIZALES.

Sitio	Litología	Exposición	Árboles en 1974	Árboles en 1994	Árb Jóvenes 94*
Manga	conglomerados	Oeste	427	1137	475
Pilitas	conglomerados	Norte	139	467	71
Escobar	ignimbritas	Sur	175	740	270
Aguila	ignimbritas	Este	144	212	23

*Árboles de tamaño inferior a dos metros; en Poulenard, 1995

Boutrais (1994) habla de « degradación verde de los pastizales ».

Viramontes concluye afirmando que « *la pérdida de la superficie del suelo es evidente, por lo que la potencialidad productiva de la zona se está perdiendo a un ritmo acelerado* » y estima que « *las consecuencias hidrológicas se reflejarán en el aumento de los escurrimientos superficiales inmediatos después de las lluvias, disminución de la infiltración y del movimiento de agua en el interior de los suelos* ».

La consecuencia más visible de esta evolución es que parece que « crecen las piedras » es decir que van apareciendo cada vez más las piedras y las gravas del suelo en la superficie, lo que disminuye la calidad del pasto. La degradación del espacio aparece claramente en la Figura 19.

2- Cambios en las vertientes. La otra evolución reciente en el paisaje de esta zona también se debe al sobrepastoreo; es la constitución de « terracitas » en las vertientes, fenómeno estudiado por Poulenard (1995) en esta área, pero ya conocido en los Alpes y en los Andes (Serrate, 1981). Su formación se debe a la repetición de las trayectorias preferenciales del ganado en una vertiente: a partir de cierto rango de pendiente (que Poulenard estimó a 20°), el ganado vacuno prefiere caminar en el sentido de las curvas de nivel, es decir, en un camino más o menos horizontal. En tiempo normal esto no influye sobre la morfología de la vertiente. Pero en caso de sobrecarga pastoral se forman estas terracitas cuando ya se degradó el pasto, y que aparecen muchas gravas en la superficie del suelo. Estas vertientes con terracitas ya están bastante extensas como se puede ver (Figura 19). Hay, en toda la cuenca alta del Nazas, vertientes enteras ya cubiertas por estas terracitas. No son un peligro en sí, pero son la consecuencia de un sobrepastoreo y disminuyen la calidad del pasto.

LA SOBREEXPLOTACIÓN FORESTAL: MITO O REALIDAD.

El tipo de explotación forestal del bosque de la Sierra Madre en el estado de Durango no permite darse cuenta de la importancia del desmonte. De hecho, están prohibidas las matarrazas completas, y se tienen que dejar árboles de regeneración.

Pero, por otra parte, el mercado de la madera es muy dinámico, y los aserraderos y transformadores de madera muy exigentes. En realidad, hay una sobreexplotación forestal. En grandes superficies se nota que la densidad de árboles es muy baja, mucho más baja que lo que se acostumbra ver en esta región. En un estudio reciente, Rodríguez (1997) demuestra que la deforestación es muy rápida. En el Cuadro 28 aparecen las tasas de desmonte en las UAF (Unidades Administrativas Forestales) de Tepehuanes y Guanaceví.

CUADRO 28. DEGRADACIÓN DEL BOSQUE DE LAS UAF DE GUANACEVÍ Y TEPEHUANES DE 1972 A 1992.

Categoría	Superf. 1972 en km ²	Superf. 1972 en %	Superf. 1992 en km ²	Superf. 1992 en %	Degradación en %
Bosque denso	662	9.3	222	3.1	66
Bosque intermedio	1 537	21.6	672	9.5	54
Bosque claro	1 967	27.7	1 203	16.9	39
Pastizal y sabana	2 032	28.6	1 868	26.3	8

La degradación del bosque es rápida sobre todo para las categorías de bosque denso e intermedio que son en general bosques de pinos, la categoría más utilizada para papelería y ebanistería. El oeste del estado de Durango es una gran región productora de madera y derivados (aserraderos de la región de El Salto, Durango, Santiago Papasquiari, Guanaceví, Tepehuanes y hasta Parral en Chihuahua, papelerías y mueblerías de Durango, etc.), pero su sobreexplotación amenaza su futuro.

Los datos del Cuadro 28 se midieron en base a unas imágenes satelitarias y a un Sistema de Información Geográfica. En las Figuras 20 y 21 aparecen los estados de la vegetación en 1972 y en 1992, lo que por comparación permite ver la extensión de las zonas desmontadas.

Las causas de este desmonte son antes de todo la presión del mercado, el comercio clandestino de la madera (se ve cortar mucha madera no marcada) y el hecho que no se observa, en casi toda la Sierra, el reglamento que impone plantar diez árboles por cada árbol cortado; la tasa real es a lo máximo el inverso (un árbol plantado por cada diez cortados), según se pudo observar en los recorridos.

FORMAS DE EROSIÓN Y SOBREPASTOREO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

LEYENDA



Zonas sobrepastoreadas (cobertura herbácea muy degradada e incistente, roca muchas veces aparente)



Zonas de « terracitas » debidas al sobrepastoreo



zapa de ribera

surcos de menos de 1 metro de profundidad

surcos de profundidad superior a 1 m. existente en 1974

encarvada desde 1974

ESCALA

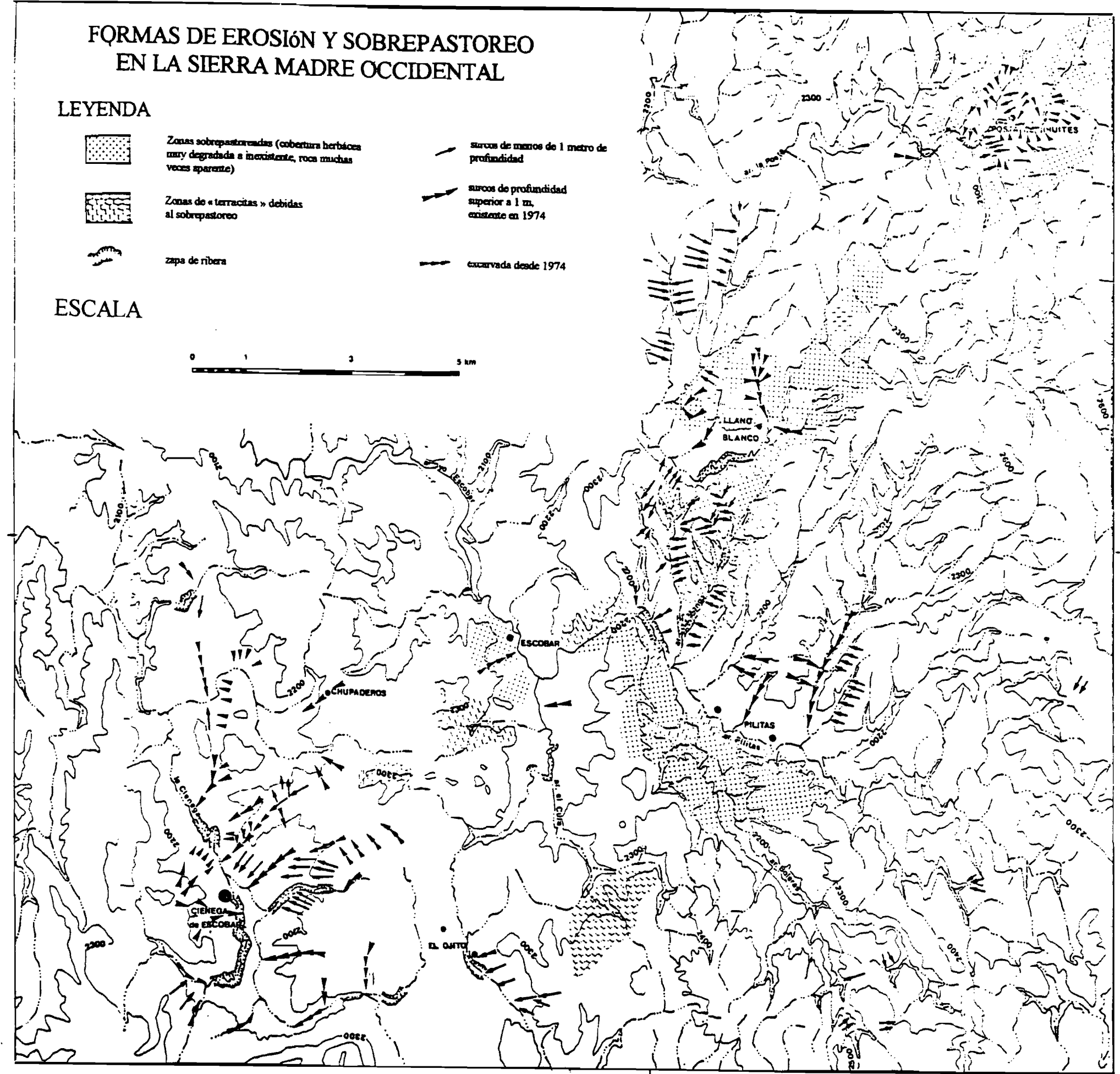


Figura 19. Mapa de las formas de erosión.

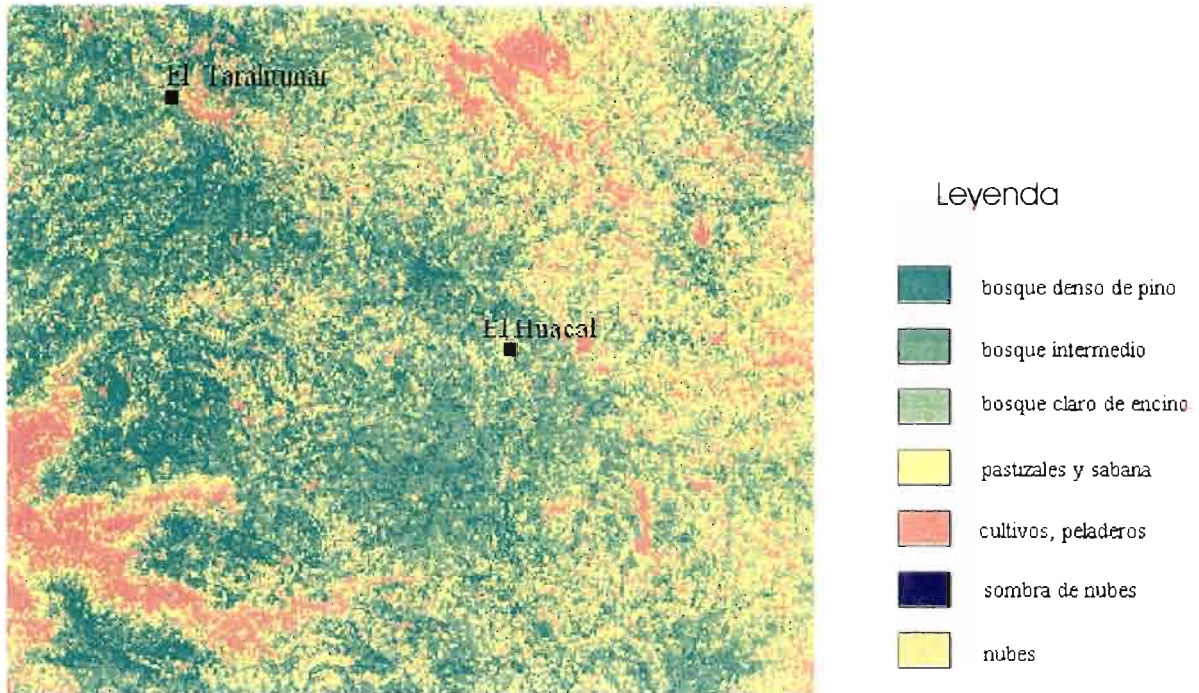


Figura 20. El estado de la vegetación en 1972.

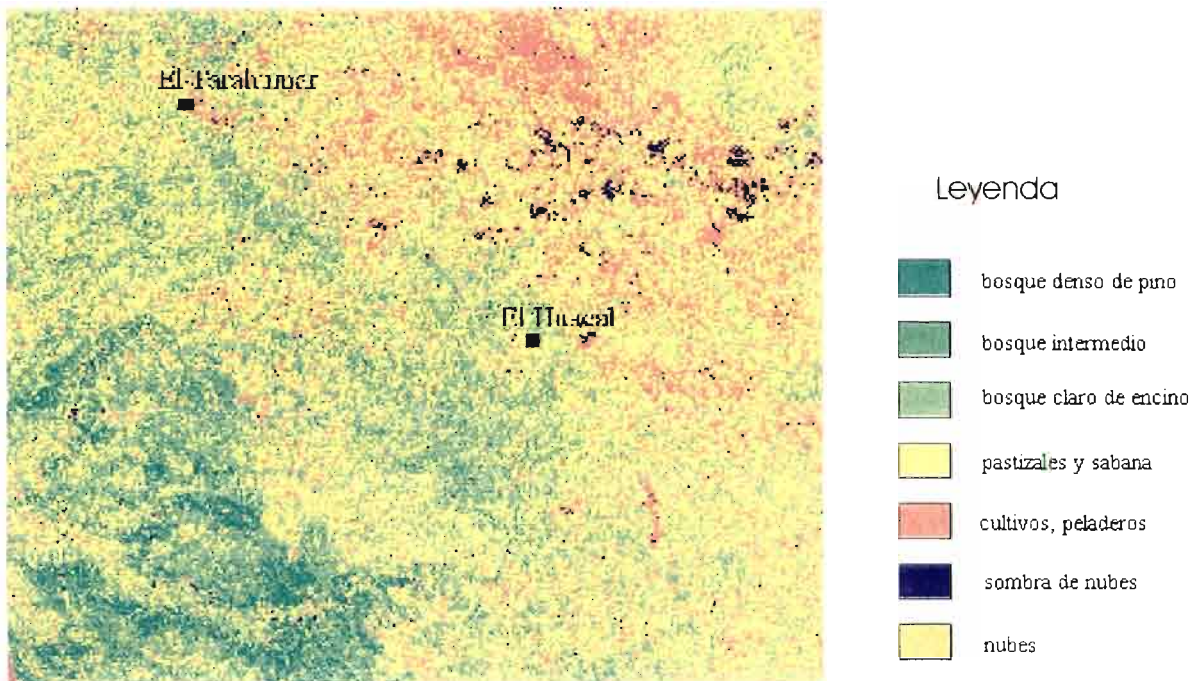


Figura 21. El estado de la vegetación en 1992

CONCLUSIÓN

La Sierra Madre Occidental constituye un reservorio de agua para todo el noroeste de México. Recibe mayores precipitaciones por su ubicación (cerca del océano) y por su altitud. Permite así el riego en regiones circundantes mucho más secas, tanto del lado del Océano como del altiplano norte central mexicano.

En toda la sierra del estado de Durango, y particularmente en la cuenca alta del río Nazas, se nota que hay una degradación del medio ambiente. No es obvia la importancia de la erosión, por ser pocas las cárcavas por escurrimiento concentrado. Además, la sierra está constituida principalmente por rocas resistentes. Pero en los pastizales se nota que hay degradación acelerada del suelo porque se ven aparecer muchas piedras (los elementos finos fueron acarreados por las aguas) y el pasto en muchas partes es ahora de baja calidad.

Los valores de erosión son débiles en zona de bosque (menos de una ton ha⁻¹/año) y bastante fuertes en zona de pastizales (sabana, de 20 a 50 ton ha⁻¹/año), aunque no parezcan tan elevados en estos climas para una zona de montaña (lo que se debe al carácter resistente del material). Pero la presencia de terracitas debidas al sobrepastoreo evidencian la sobreexplotación y la degradación reciente del medio ambiente, que parece ser del tipo « *degradación verde de los pastizales* » (Boutrais, 1994). En zona de bosques no parecen haber cambiado mucho las condiciones de escurrimiento y erosión, a pesar del rápido desmonte (66 por ciento del bosque denso desapareció en los últimos 25 años en los municipios de Guanaceví y Tepehuanes). Esto podría a mediano plazo acelerar la erosión y modificar las condiciones del escurrimiento, aunque por el momento no se notan cambios importantes.

Se hicieron modelos de los escurrimientos y se pudieron calcular coeficientes de 0.05 a 0.27, según las características del medio, para un promedio de 0.13 en toda la cuenca. Los principales factores del escurrimiento son la cantidad de lluvia precipitada con intensidad superior a 2 mm/h (lluvia útil) en cuencas con ignimbritas, o superior a 6 mm/h en cuencas con conglomerados; en ambos casos, este parámetro se multiplicó por el índice de Kolher. Este último tiene un papel de primer orden, pues comprueba que el estado de humedad preliminar de las cuencas influye de manera importante en el escurrimiento: las cuencas se comportan como si tuviesen un tanque de agua que se llena con las primeras lluvias, y no hay escurrimiento mientras se esté llenando este tanque hasta que se desborda. Esto se pudo comprobar tanto a nivel cuenca como a nivel parcela. Así, se demuestra que el suelo tiene un papel importante en el recurso agua y su evolución, lo que pone de manifiesto la necesidad de cuidar el suelo, y se opone a lo observado en la zona semiárida (cuencas de Atotonilco), donde no parece haber « tanque de agua » en las cuencas, y donde los estados de superficie son los que gobiernan el escurrimiento.

El porvenir del recurso suelo-agua es importante tanto para las regiones circundantes como para la sierra misma. La evolución de su clima puede también ser condicionada por el estado de estos recursos. Por eso, es importante cuidar el medio ambiente de la Sierra Madre, de manera que se garanticen las aportaciones futuras de agua a las regiones secas.

BIBLIOGRAFÍA

- Barral, H.; E. Anaya. 1995. « Evolución de los pastizales » Proyecto INIFAP-ORSTOM, Gómez Palacio, Dgo., 60p.
- Boutrais, J. 1994. « Eleveurs, bétail et environnement », A la croisée des parcours, ORSTOM-Centre d'Etudes Africaines, Paris, p.303-319.
- Casenave, A., C. Valentin. 1989. « Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration », ORSTOM, coll. Didactiques, 1989, Paris, 229p.
- Cochet, H. 1993. « Agriculture sur brûlis, élevage extensif et dégradation de l'environnement en Amérique Latine (un exemple en Sierra Madre del Sur, Mexique) », revista Tiers Monde, t.XXXIV, N°134, p.281-303, Paris.
- Cosandey, C. 1992. « Influence de la forêt sur le cycle de l'eau; conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel »; Hydrol. Continent., Vol. 7, N°1, pp 13-22.
- Descroix, L. 1994. « L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud » tesis de doctorado de geografia, Université Lumière-Lyon II, Lyon.
- _____ 1996. « Méthodes de mesure de l'érosion actuelle: applications dans les Préalpes du Sud (Alpes, France) et dans la Sierra Madre Occidentale (Mexique) », Journées Erosion 1996, Le Pradet-Grenoble-Montpellier, pp.239-254.
- Descroix, L., J. Poulenard. 1995. « Les formes d'érosion dans la Sierra Madre Occidentale (Nord Ouest du Mexique): vers une cartographie de l'érosion », Bull. Labo. Rhô. Géom., N°33 y 34, Lyon, Francia.
- Descroix, L., S. Moriaud. 1995. « Evolución de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental (Norte de Durango) de 1972 a 1992 », VII simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, Nov.1995, pp.17-24.
- Estrada A. J. 1995. « Modélisation conceptuelle appliquée aux bassins-versants du Nord-Mexique (RH 36) », tesis de DEA, Université Montpellier II, 75 p.
- Gentry, H.S. 1957. « Los pastizales de Durango. Estudio ecológico, fisiográfico y florístico » IMRNR, México.
- Gómez, A. 1997. « Evaluación del escurrimiento y la erosión hídrica en la subcuenca Sardinias de la Región Hidrológica 36 », tesis de ingeniería, UAAAN, Unidad Laguna, Torreón, 53p.
- Guédez, P.Y. 1996. « Déforestation et érosion dans la Sierra Madre Occidentale » reporte de trabajo de campo, Istom, Paris, 95p.

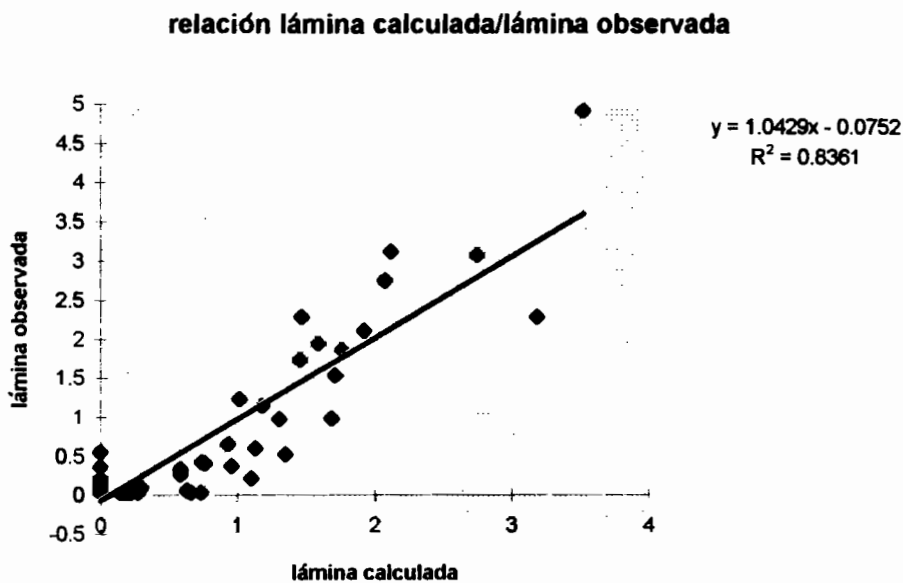
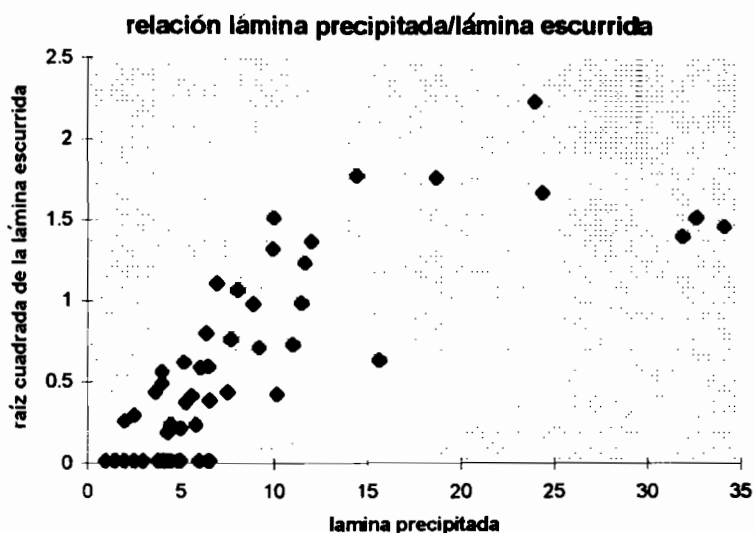
- Henry, O. 1997. « Etude de l'impact de la déforestation et des pluies dans la Sierra Madre Occidentale », reporte de trabajo de campo, Istom, Paris, 78p.
- Nouvelot, J.F., L. Descroix. 1996. « Aridité et sécheresses du Nord-Mexique », en Trace, revista del CEMCA (Centro de Estudios Mexicanos y Centro Americanos), N°30, pp 9-25, México, D.F.
- Poulenard, J. 1995. « Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre Occidentale » reporte de trabajo de campo, Istom, Paris, 82p.
- Poulenard, J., L. Descroix; J.L. Janeau. 1996. « Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale (Nord-Ouest du Mexique) », Revue de Géographie Alpine, t.84, N°2, pp 77-86, Grenoble, Francia.
- Roose, E. 1973. « Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire: contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical », thèse de Docteur Ingénieur, Pédologie, Université d'Abidjan, N°20, 124p.
- Rougerie, G. 1978. « Erosion des sols et couverts végétaux »; Hérodote N°12, Maspéro, Paris.
- Rzedowski, J. 1978. « Vegetación de México » Editorial Limusa, Mexico, D.F.
- Rodríguez, M.G. 1997. « Determinación de la vegetación en la Sierra Madre Occidental para la calibración de imágenes de satélite » tesis de licenciatura, Escuela de Ciencias Forestales, UJED, Durango, 60p.
- Serrate, C. 1981. « Recherches en Briançonnais », DGRST, 1981, Université Paris VI, Laboratoire de Géographie Physique, Paris.
- Viramontes P., D. 1995. « Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas », INIFAP-ORSTOM, 42 p., Gómez Palacio, Dgo.

ANEXOS

MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA EL CURA.

Parámetros de la ecuación para la cuenca El Cura.

Hmax	111.54241
Pmax	18.736778
Pmin	0
Kmax	0.1470628
Kmin	0.1105444
A	0.0538291
C	0.3215602

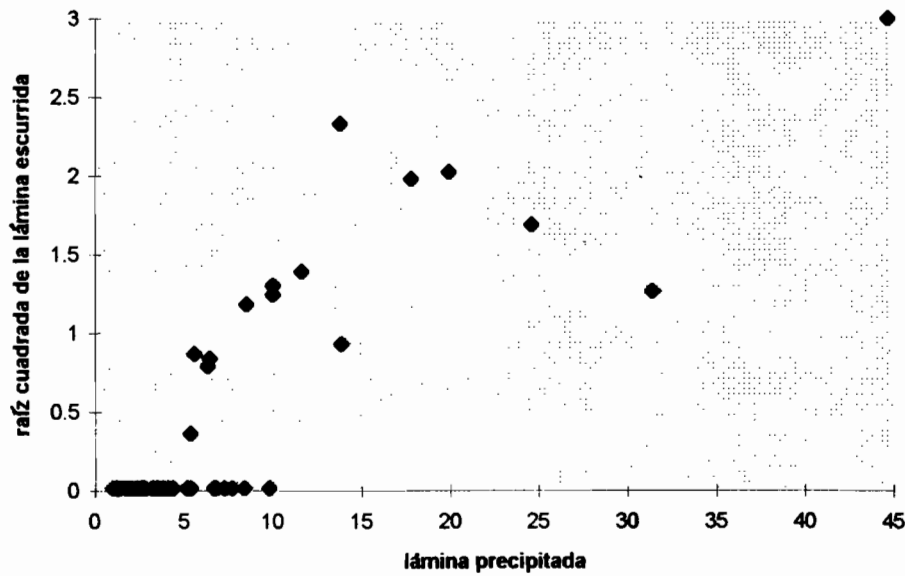


MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA ESMERALDA.

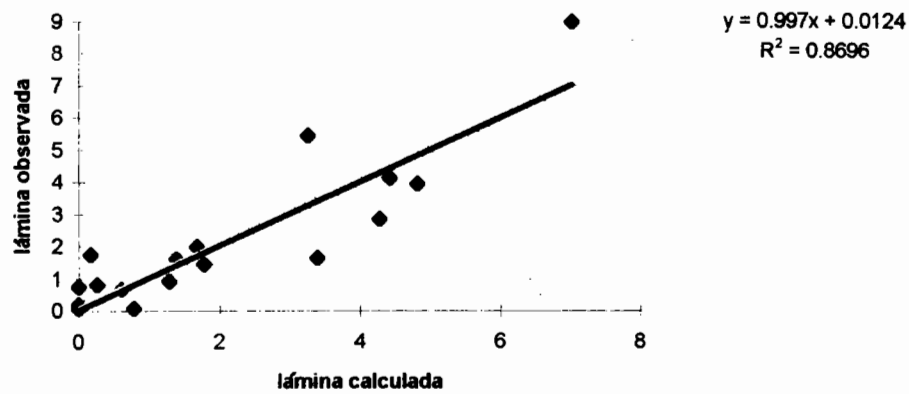
Parámetros de la ecuación para la cuenca Esmeralda.

ESMERALDA	
Hmax	169.101213
Pmin	0
Pmax	16.1520105
Kmin	0.06049393
Kmax	0.34572664
A	0.08317914
C	0.07360635

relación lámina precipitada/lámina escurrida



relación lámina calculada/lámina observada

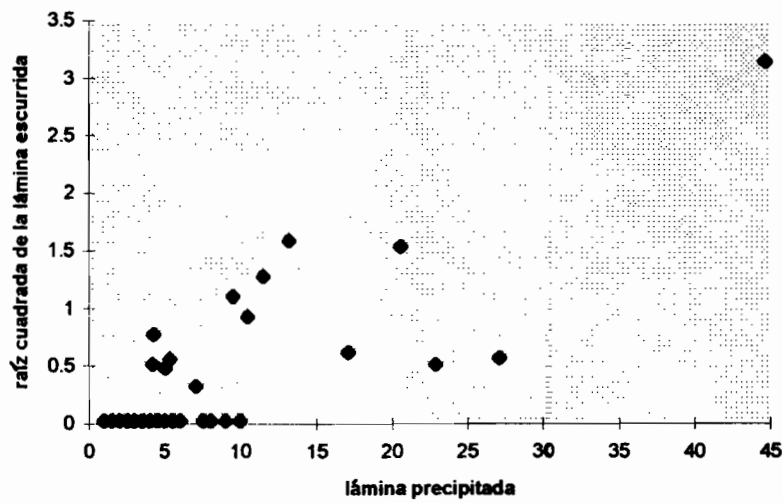


MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA LA MANGA.

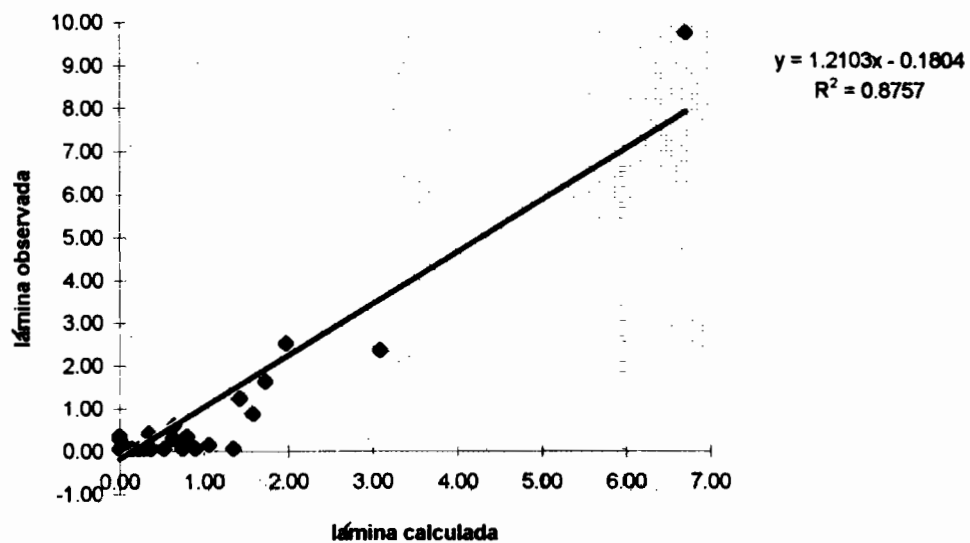
Parámetros de la ecuación para la Cuenca La Manga.

MANGA	
Hmax	195
C	0.12
Kmin	0.02
A	0.005
Pmin	0.00
Kmax	0.15
Pmax	17.00

relación lámina precipitada/lámina escurrida



relación lámina calculada/lámina observada

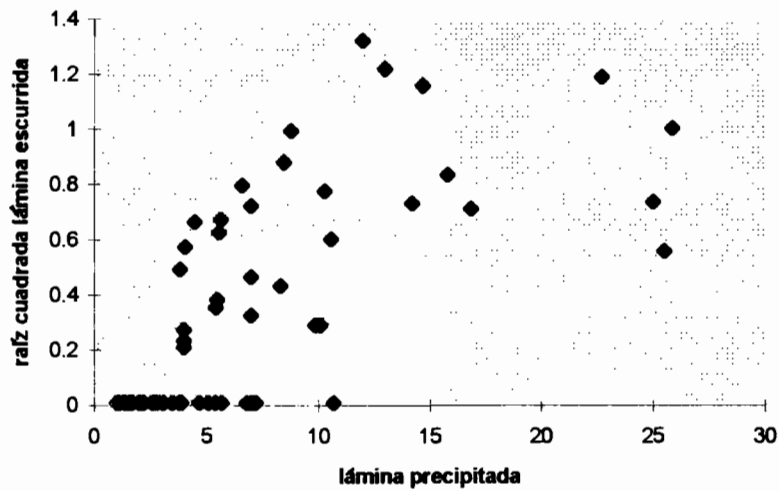


MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA PILITAS.

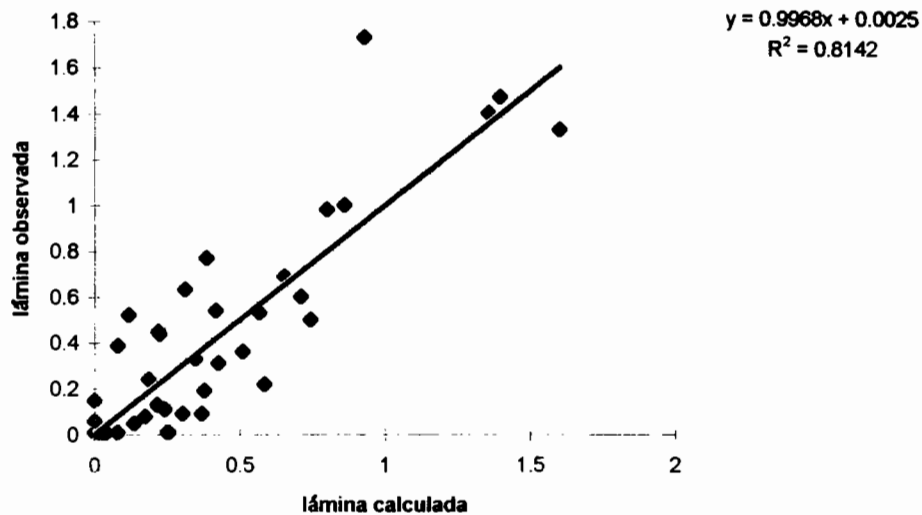
Parámetros de la ecuación para la cuenca Pilitas.

PILITAS	
Hmax	100
Pmax	6.06857012
Pmin	0
Kmax	0.18205602
Kmin	0.02692065
A	0.12961515
C	0.07469763

relación lámina precipitada/lámina escurrida



relación lámina calculada/lámina observada



En la serie de los Folletos Científicos, ya publicados :

N° 1.- LOYER J. Y.; J. ESTRADA; R. JASSO; L. MORENO. eds. 1994. *Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. 367 p.*

N° 2.- ORONA, I., D. GALLARD. 1994. *Organización y manejo del agua en la parte media de la cuenca Aguanaval. 36 p.*

N° 3.- VIRAMONTES, D. 1995. *Caracterización de los suelos y vegetación en la parte alta de la Cuenca Nazas. 45p.*

N° 4.- SANCHEZ, I. 1995. *Erosión y productividad en la Comarca Lagunera. 30 p.*

N° 5.- ANAYA, E., H. BARRAL. 1995. *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. 77 p.*

N° 6.- LOYER, J. Y., S. MORIAUD. 1996. *Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. 117 p.*

**Esta publicación se terminó de imprimir en el mes
de febrero de 1998 en los talleres del
Centro Nacional de Investigación
Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.
km. 6.5 margen derecha
Canal Sacramento.
Gómez Palacio, Dgo.
Su tiraje consta de 300 ejemplares.**

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

ING. JORGE KONDO LÓPEZ

Director en Jefe

M.C. MANUEL GARCÍA LÓPEZ

Director General de Coordinación y Desarrollo

DR. LUIS ÁNGEL RODRÍGUEZ DEL BOSQUE

Director General de Intercambio Científico

DR. RODRIGO AVELDAÑO SALAZAR

Director General División Agrícola

DR. HERIBERTO ROMÁN PONCE

Director General División Pecuaria

DR. CARLOS RODRÍGUEZ FRANCO

Director General División Forestal

LIC. DAVID VEGA OSORIO

Director General de Administración

DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

Director del CENID-RASPA

C.P. ALEJANDRA MARTÍNEZ MARTINEZ

Coordinador Administrativo

ING. HILARIO MACÍAS RODRÍGUEZ

Jefe de Operación

M.C. LEOPOLDO MORENO DÍAZ

Coordinador de Investigación

ING. RAQUEL ANGUIANO GALLEGOS

Difusión Técnica



CRSTOM