HAL open science

Cuantificación del escurrimiento y erosión hídrica en andosoles de una microcuenca experimental en Valle de Bravo

David Viramontes, Michel Esteves, Celine Duwig, Fernando Rojas-Rojas, Alfonso Gutíerrez, Benjamín de León-Mojarro

To cite this version:

David Viramontes, Michel Esteves, Celine Duwig, Fernando Rojas-Rojas, Alfonso Gutíerrez, et al.. Cuantificación del escurrimiento y erosión hídrica en andosoles de una microcuenca experimental en Valle de Bravo. Ingenieria hidraulica en Mexico, 2008. ird-02153490

HAL Id: ird-02153490

https://ird.hal.science/ird-02153490v1

Submitted on 12 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ingeniería hidráulica en México, vol. XXIII, núm. 3, pp. 89-103, julio-septiembre de 2008

Cuantificación del escurrimiento y erosión hídrica en andosoles de una microcuenca experimental en Valle de Bravo

David Viramontes

Laboratoire de Géographie Physique, Francia

Michel Esteves

Institut de Recherche pour le Développement, Francia

Luc Descroix

Institut de Recherche pour le Développement, Nigeria

Celine Duwig

Institut de Recherche pour le Développement, Francia

Fernando Rojas-Rojas
Alfonso Gutiérrez
Benjamín de León-Mojarro

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Este trabajo presenta los resultados de la cuantificación del escurrimiento de superficie y erosión hídrica de una microcuenca experimental en andosoles del eje neovolcánico en Valle de Bravo, México. Los resultados de la cuantificación y modelación a partir de variables pluviométricas demuestran que en el nivel de parcelas experimentales, los eventos de escurrimiento presentan una gran variación temporal de la respuesta hidrológica. En el nivel de la microcuenca (50 ha), las ecuaciones obtenidas permiten presentar explicaciones sobre el escurrimiento y la pérdida de suelo. El escurrimiento de superficie es explicado a partir de la lámina de lluvia que se presenta después de una intensidad igual o superior a 20 mm/h. Las tasas de erosión se explican en función de las variables lámina escurrida e intensidad máxima en diez minutos. La pérdida de suelos es provocada por las lluvias de mayor intensidad (muy pocos eventos de lluvia pueden ser los responsables de la mayor parte de la erosión anual). Los resultados de la cuantificación, localización de umbrales y modelación exponen que los escurrimientos de superficie son mínimos y en bosques cerrados pueden ser nulos. Se demuestra que las zonas de mayor producción de escurrimientos son las praderas, pero con tasas de erosión menores. En cambio, las zonas agrícolas con escurrimientos débiles presentan tasas de erosión muy importantes; la pendiente es el factor determinante del suelo perdido. Esto demuestra que los andosoles son resistentes a la erosión cuando no son perturbados, pero pueden ser muy frágiles en condiciones de degradación.

Palabras clave: cuenca, parcela, escurrimiento superficial, erosión hídrica, andosol, variables pluviométricas, Valle de Bravo, México.

Introducción

Los suelos de tipo andosol, originados a partir de cenizas y partículas volcánicas fácilmente alterables, presentan características específicas que los hacen permeables y muy resistentes a la erosión, sobre todo si están protegidos de una cubierta vegetal. Sin embargo, bajo condiciones de degradación o de uso constante (deforestación, sobrepastoreo, cultivos) sus propiedades físicas intrínsecas pueden cambiar drásticamente y ser muy frágiles a los procesos erosivos (Duchaufour, 2001; Pinheiro *et al*., 2004; Auxtero *et al*., 2004). En andosoles del Valle de México, Etchevers (1986) y Rodas-Cifuentes *et al*. (2001) han observado una baja densidad aparente y una fuerte fijación de fósforo. Según los mismos autores, los minerales presentes son la gibsita, caolinita y esmectita en poca proporción. Diferentes estudios en el mundo tratan de explicar los procesos que se generan en la relación lluvia-escurrimiento-erosión en el nivel de parcelas y cuencas con suelos de tipo andosol. Entre otros, se pueden mencionar a Fontes *et al*. (2004) en las Islas Azores; Rodríguez-Rodríguez *et al*. (2006) en las Islas Canarias, y Zehetner y Miller (2006) en los andes ecuatorianos. Otros estudios han utilizado métodos de infiltrometría para explicar la hidrodinámica de este tipo particular de suelos. Tal es el caso de trabajos como los de Eguchi y Hasegawa (2002) en Japón y Auxtero *et al*. (2004) en las Islas Azores de Portugal.

En México, los andosoles se localizan principalmente en varios sectores de la parte central a nivel del eje neovolcánico. Se trata de la zona de mayor densidad poblacional, que incluye grandes ciudades (México, Puebla, Morelia, Cuernavaca, entre otras). En estas regiones, la presión que se ejerce sobre los recursos vegetales tiene impactos negativos sobre los suelos que los sustentan y puede a su vez tener consecuencias en la disponibilidad de los recursos hídricos (Viramontes *et al.*, 2005). Algunos autores se han interesado en este tipo de estudios en andosoles de México; tal es el caso de Sedov *et al*. (2003) en la región del Nevado de Toluca y Hudson (2003) en la cuenca del río Pánuco.

El área de estudio de este trabajo se localiza en un sector montañoso de la cuenca Valle de Bravo, la cual forma parte del Sistema Hidrológico Cutzamala, que alimenta de agua potable a la ciudad de México. Las cuencas volcánicas de este sistema presentan condiciones de sobreexplotación, lo que podría tener consecuencias en la disponibilidad del recurso hídrico. El objetivo de este trabajo es caracterizar el funcionamiento hidrológico de superficie y la fragilidad erosiva de los suelos en el nivel de parcelas y de una pequeña cuenca. Para esto se utilizan mediciones hidrométricas y de producción de sedimentos, y se determinan las características de la lluvia que influyen directamente en la producción de escurrimientos de superficie y erosión. En efecto, no se trata de una modelación clásica del escurrimiento y erosión (puesto que estas variables son medidas directamente), ni de una regionalización de las mediciones, el propósito es presentar explicaciones de la forma de precipitación (a partir de la descomposición de los pluviogramas y obtención de variables pluviométricas), el desarrollo del escurrimiento de superficie y el efecto erosivo en andosoles del área de estudio.

La Cuenca Valle de Bravo en el Sistema Hidrológico Cutzamala

El Sistema Hidrológico Cutzamala tiene cada vez mayor importancia hidrológica como proveedor de agua potable en el área metropolitana de la ciudad de México. Actualmente, las necesidades hídricas de esta metrópoli ascienden a 70 m^3/s. Los recursos hídricos superficiales de las diferentes cuencas del Sistema Cutzamala suman un 25% de esta demanda. Considerando que el resto de las aguas proviene de los mantos freáticos, los cuales presentan diferentes estados de sobreexplotación, las aguas superficiales de este sistema toman mayor importancia día con día.

La presa Valle de Bravo tiene una capacidad de almacenamiento total de 400 Mm^3 y la cuenca aporta 6 m^3/s al Sistema Cutzamala (CNA-Semarnat, 2001). Es decir, de acuerdo con su capacidad, se trata del embalse y la cuenca más importantes de este sistema. Por otro lado, existe también un potencial forestal, agrícola y turístico importante. Esta relevancia hidrológica y económica, tanto local como regional, hacen de esta cuenca un sitio estratégico y prioritario en los planes nacionales hidrológicos y forestales.

No obstante su importancia hidrológica y económica, esta cuenca no es la excepción en el estado de degradación del resto de cuencas del Sistema Hidrológico Cutzamala. Las zonas pobres menos desarrolladas presentan diferentes estados de erosión hídrica visibles en el paisaje forestal y en zonas agrícolas en pendientes. La cuenca Valle de Bravo presenta por lo general suelos volcánicos, principalmente andosoles, los cuales tienen propiedades hidrodinámicas e hidroquímicas particulares, y pueden ser muy sensibles a la erosión hídrica. En este trabajo se caracteriza la fragilidad de estos suelos en función de las características climatológicas de la zona. Para ello fue necesario obtener

y analizar datos experimentales que ponen en evidencia fenómenos y procesos hidrológicos del comportamiento hidro-erosivo de la zona de estudio.

Metodología

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha reconocido que para resolver muchos problemas de producción de cultivos, conservación de suelos y degradación de cuencas, se requiere hacer estimaciones de escurrimientos y erosión (FAO, 1997). De igual manera, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha expuesto que para hacer frente a la creciente necesidad de agua dulce y mitigar los efectos de la degradación del medio, se requiere de datos sobre las variables hidrológicas y los suelos (OMM, 1994).

Ante la problemática de insuficiencia de datos meteorológicos, hidrométricos y de sedimentos, y la creciente demanda de evaluaciones objetivas de impactos, valorización de los recursos naturales (en este caso suelos), así como la obtención de nuevos conocimientos sobre el funcionamiento hidrodinámico de suelos y cuencas, se ha considerado a las microcuencas como unidades geográficas naturalmente indicadas para la investigación de fenómenos y procesos que intervienen en el balance hidrológico. Esta metodología de ninguna manera puede suplir la necesidad de mediciones oficiales en cuencas y ríos; sin embargo, sí es posible obtener bases de datos que pueden ser utilizados en la elaboración y utilización de modelos de predicción, así como su aplicación en la gestión ordenada de los recursos.

A fin de contar con una base de datos funcional se ha instrumentado y dado seguimiento a una microcuenca donde se han realizado los diferentes ensayos experimentales. La microcuenca experimental La Loma, localizada en la cuenca Valle de Bravo, en el municipio de Amanalco de Becerra, fue seleccionada porque en ella coincide una gran parte de la variabilidad de ambientes característicos del área de estudio: suelos de tipo andosol principalmente, bosques, agricultura tradicional en laderas con diferentes pendientes y zonas en descanso (Viramontes *et al*., 2004). Es importante señalar también la presencia de una comunidad que ha aceptado la realización de estos trabajos en su territorio. La microcuenca tiene 50 ha de superficie y cuenta con diferentes instrumentos de medición que permiten obtener datos de su balance hídrico y comportamiento hidro-erosivo (ilustración 1).

En el sector forestal de la microcuenca se delimitaron dos parcelas experimentales de tamaño y pendientes muy similares (PB01 con 54.8 m^2 y 36.7% de pendiente, y PB02 con 52.1 m^2 y 36.1% de pendiente). La diferencia entre ambas es que la primera (PB01) cuenta con una cobertura arbórea importante y una capa de mantillo superficial de 10 a 15 cm de profundidad. En cambio, en la PB02, los árboles han sido cortados y el mantillo superficial casi ha desaparecido. Esta segunda parcela está compuesta principalmente por especies herbáceas y algunos matorrales. Se puede considerar como un sitio con fines de pastoreo. La forma de medición del escurrimiento y erosión de estas parcelas fue directa y total en tambos de recepción. La precipitación fue medida con un pluviómetro digital y otro de medición directa al exterior de los árboles, así como por una red de 17 pluviómetros de medición directa bajo diferentes coberturas arbóreas en una superficie de 600 m^2 de la zona forestal (ilustración 2).

También fueron seleccionadas y delimitadas dos parcelas agrícolas. Estas parcelas (PA23 y PA67) tienen una superficie de 0.347 y 0.392 ha, respectivamente. Ambas fueron cultivadas con maíz y se diferencian por el orden de pendiente (PA23 con 27.9% y PA67 con 8.7%). En estos casos, la forma de medición se realizó con vertedores H y sensores de presión con capturador de datos Hobo. Con el fin de realizar calibraciones de los vertedores y tener conocimiento de los sólidos suspendidos, se realizaron mediciones de gastos y muestreos directos durante los eventos de lluvia. La precipitación fue medida con un pluviómetro digital instalado en la parcela PA67.

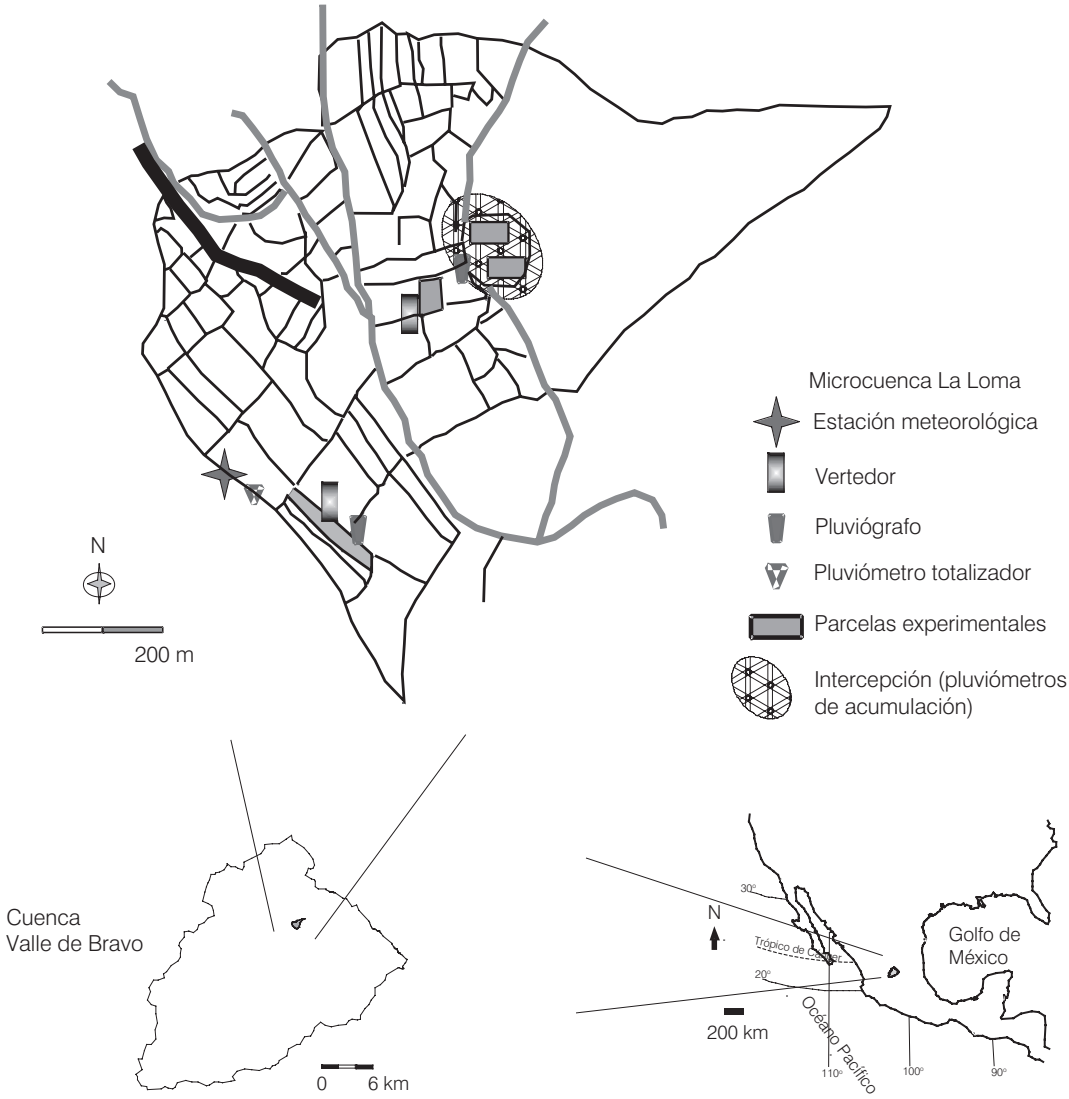
Por otro lado, las mediciones de escurrimiento y erosión se realizaron también en el nivel de la salida principal de la microcuenca. En este caso se utilizó un vertedor tipo Parshall y un limnígrafo tipo Thalimedes (Ott). Al igual que en las parcelas agrícolas, se realizaron muestreos directos de escurrimientos y carga de sedimentos durante los eventos de escurrimiento.

Resultados

Precipitación e intercepción

La intercepción es la parte de la lluvia que queda retenida en el dosel de la vegetación. Con el dispositivo para medir la intercepción (red de 17 pluviómetros bajo diferentes coberturas arbóreas) fue posible trazar las isoyetas bajo el dosel del bosque para cada uno de los eventos de lluvia (ilustración 2). Durante los eventos de lluvia no se observaron líneas de escurrimiento corriendo a través de los troncos. Aparentemente, la formación de las ramas de los árboles (pinos de cuatro a siete metros) no hace circular fácilmente los escurrimientos

Ilustración 1. Localización e instrumentación de la microcuenca experimental en la cuenca Valle de Bravo.



al pie del tronco, esto coincide con las mediciones casi inapreciables de escurrimientos en pinos de la Sierra de Durango (Guedez, 1996; Descroix y Nouvelot, 1997), así como en coníferas de bosques alemanes, donde el valor del escurrimiento en troncos representa sólo el 1% (Lunte, 1954, citado por Musy, 2004). Esta medida es muy variable en función de las especies de árboles y el tipo de clima. De manera contraria a nuestra área de estudio, en bosques de acacias en Australia, Langkamp *et al.* (1982), citado por Musy (2004), observa que el escurrimiento en troncos representa el 16% del balance hídrico anual.

La ilustración 3 presenta una comparación entre la lluvia promedio obtenida bajo el dosel en la zona de mayor cobertura (PB01) y el pluviómetro exterior. Los valores calculados de intercepción total en las temporadas de lluvias 2002 y 2003 fueron 14.5 y 17.8%, respectivamente. Esto representa un promedio interceptado por evento de 3.6 mm, con una capacidad máxima almacenada por intercepción de 11.0 mm en un evento. Los registros muestran que la intercepción varía desde un 70 hasta solamente un 3%, en función de la cantidad e intensidad de las lluvias. Como se observa en la ilustración 2, sobre todo son las lluvias menores de 15 mm las que quedan atrapadas en una mayor proporción en el dosel de la vegetación. La intercepción de la lluvia es el primer factor de influencia en la producción de escurrimientos y erosión debido a la disminución de la lámina e intensidad de la lluvia en las zonas cubiertas de bosque.

Ilustración 2. Trazo de isoyetas bajo el dosel. Ejemplo de lluvias del 19 de junio y 19 de julio de 2003.

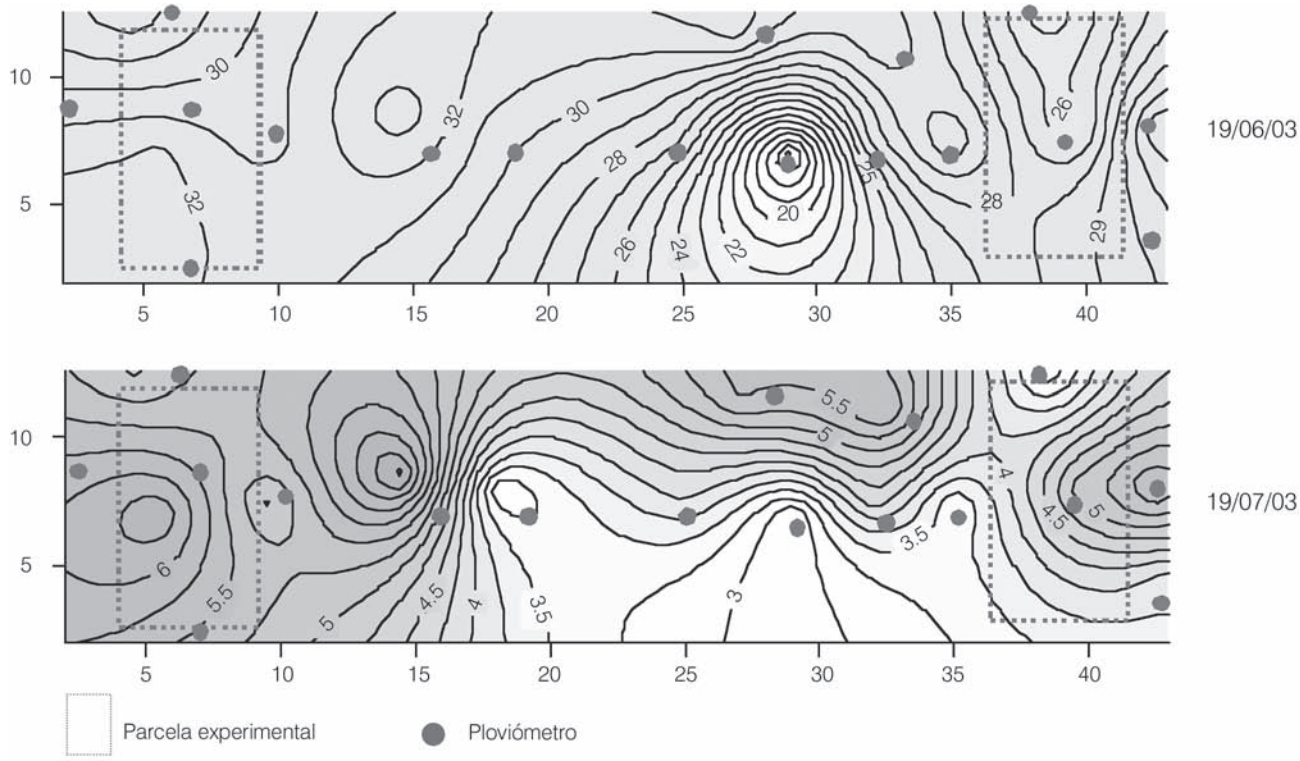
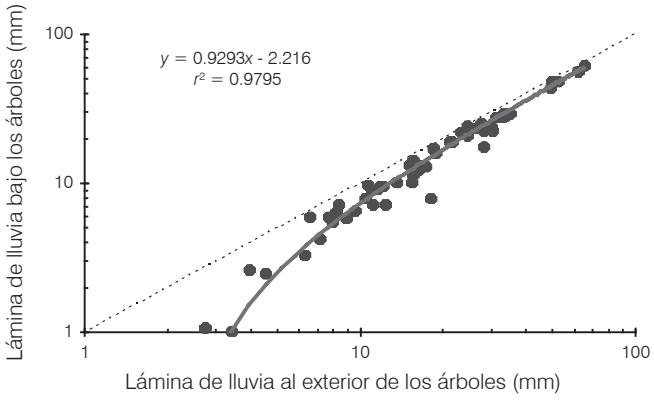


Ilustración 3. Comparación entre la lámina precipitada al interior y fuera de la influencia de los árboles (periodos 2002 y 2003).



Cuantificación de los escurrimientos superficiales y la erosión hídrica

Los resultados globales de la cuantificación del flujo superficial y la erosión producida se encuentran en el cuadro 1. Se presentan los datos del año 2003, porque en esta temporada se lograron resultados de las cinco estaciones de medición completas. Además, el año 2003 registró el doble de los eventos de escurrimiento que en los años 2002 y 2004. Se observa que la parcela forestal con una cubierta arbórea importante (PB01) no presentó ningún escurrimiento; incluso ante un evento excepcional de 95.7 mm, registrado el 19 de julio 2002, y con un periodo de retorno de más de cien años, no fue capaz de provocar escurrimientos superficiales. Es importante señalar que las series históricas de las estaciones Valle de Bravo y Amanalco nunca antes habían registrado una lluvia de tal magnitud.

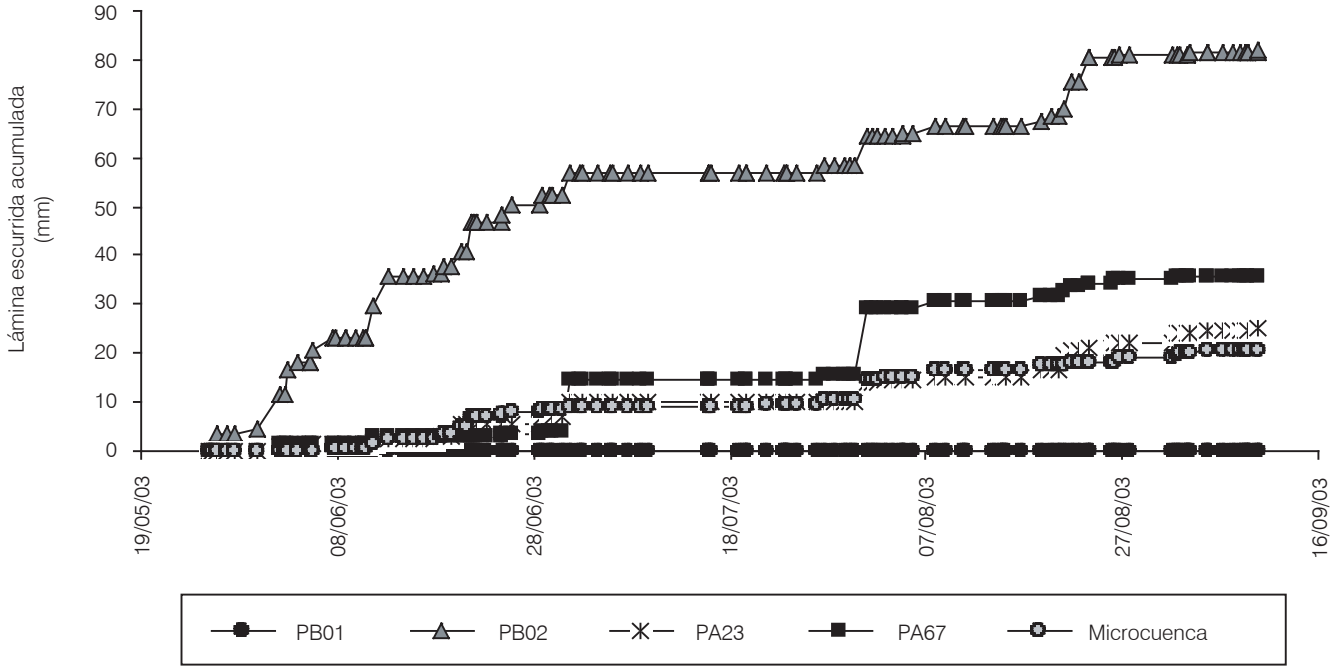
En cambio, la parcela PB02 (en zona forestal, pero con muy baja cobertura arbórea) presentó los escurrimientos máximos registrados. No obstante, en esta parcela sólo se registraron algunas trazas de erosión. Entre las parcelas agrícolas, la parcela PA23, con una mayor pendiente, obtuvo escurrimientos y tasas de erosión superiores que la parcela PA67.

Es importante notar que los coeficientes de escurrimientos son mínimos (hasta menos del 5% en la PB02). La zona estudiada tiene condiciones muy favorables para la infiltración. De aquí que pueda explicarse la existencia de varios manantiales en la zona de estudio.

Cuadro 1. Escurrimiento promedio tasa de erosión anual (2003) en las estaciones de medición.

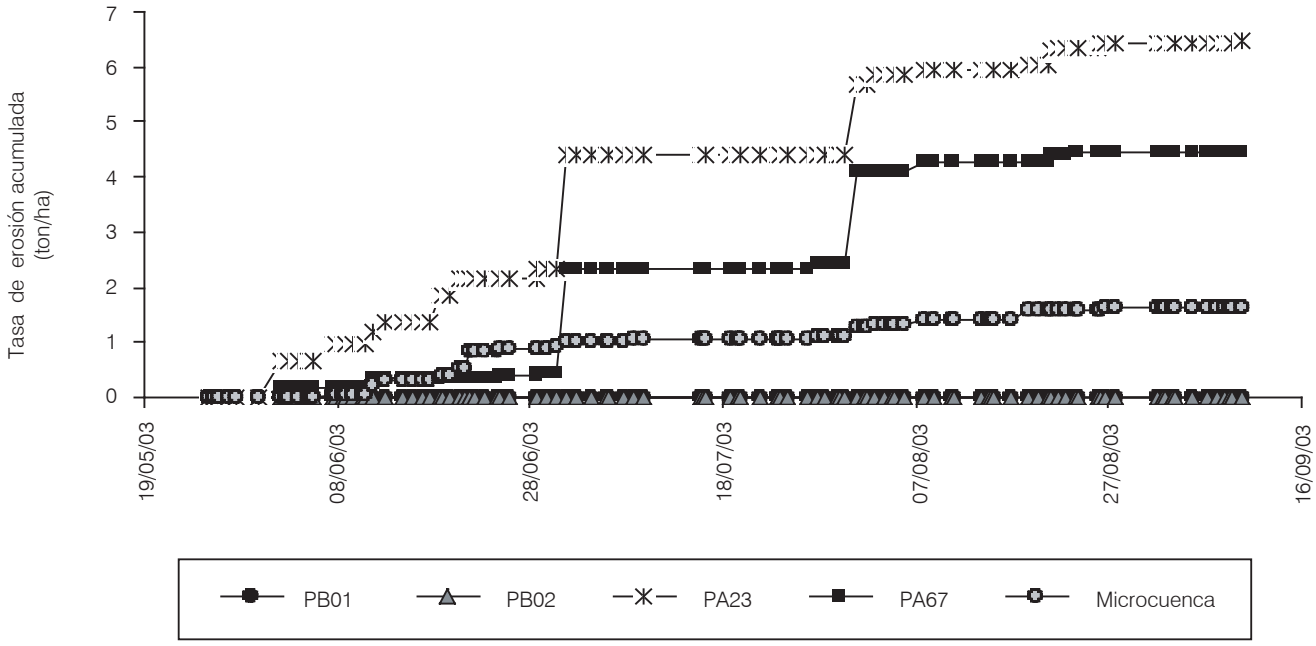
Temporada 2003 (25/05/03 a 09/09/03)		Estaciones de medición				
		PB01	PB02	PA23	PA67	Microcuenca
Precipitación	Núm. de eventos	115	115	115	115	115
	lámina (mm)	1 155.1	1 070.8	1 155.1	1 088.2	1 066.2
Escurrimiento	Núm. de eventos	0	35	26	20	28
	Lámina (mm)	0	49.5	25	21.9	16.9
	Coeficiente (%)	0	4.6	2.2	2	1.6
Erosión	Tasa en (ton/ha)	0	Trazas	6.5	4.4	1.6

Ilustración 4. Láminas escurridas acumuladas para cada uno de los puntos de medición durante el periodo de medición 2003.



Las ilustraciones 4 y 5 muestran los valores acumulados de láminas escurridas y tasas de erosión producidas durante la temporada de lluvias 2003. De las primeras semanas de la temporada hasta finales de junio se observan valores de flujo y sedimentos muy importantes. Después de un periodo de estabilidad de algunas semanas con eventos menores, se presenta un evento excepcionalmente importante (57 mm de lluvia en el evento del 31 de julio 2003). Posteriormente, de agosto a septiembre se observan eventos de escurrimiento y erosión con menor agresividad que al principio de la temporada. Se observa que son los eventos excepcionalmente fuertes los que provocan la mayor parte de los escurrimientos superficiales y tasa de erosión. Durante el año 2002, el evento excepcional del 19 julio provocó más del 80% de escurrimiento y de la erosión de la temporada. En la temporada del año 2003, con más eventos de lluvia y una mayor precipitación acumulada, los tres eventos más importantes de cada estación de medición provocaron más del 40% de los flujos superficiales y entre el 50 y 90% de la producción de sedimentos. La descomposición de los pluviogramas para obtener las variables pluviométricas presentadas

Ilustración 5. Producción de sedimentos por evento acumulados en las diferentes estaciones durante el periodo de medición 2003.



a continuación podrá exponer mejores razones de la variabilidad temporal de la erosión.

Variables pluviométricas

Utilizando los pluviogramas diarios obtenidos en cada una de las estaciones de medición se calcularon diferentes variables pluviométricas para cada uno de los eventos de lluvia. El objetivo fue determinar las características específicas de la lluvia (en cantidad, e intensidad o agresividad) que influyen directamente en el desarrollo de los escurrimientos de superficie y producción de sedimentos. Las variables utilizadas fueron las siguientes:

- Lluvia útil (PU_X). Corresponde a la cantidad de lluvia caída (en mm), con una intensidad superior o igual a *X* milímetros por hora. Se utilizaron las lluvias útiles con intensidades límite de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 mm/h.
- Intensidad máxima de la lluvia (I_Y). Es la intensidad máxima del evento de lluvia en un intervalo de tiempo *y* en minutos (mm/h). Se utilizaron intervalos de tiempo de 5, 10, 15, 30, 45, 60 y 90 minutos.
- Energía cinética. Ésta se obtiene a partir de la fórmula de Wischmeier y Smith (1978).

$$EC = 11.9 + 8.72 * \log_{10} (I)$$

Donde:

EC = energía cinética en Joules/m^2.
I = intensidad de la lluvia (mm/h).

Las matrices de datos obtenidas fueron complementadas con los valores de lámina escurrida (LE) y la tasa de erosión (ERO) de cada una de las estaciones de medición. El cuadro 2 muestra los coeficientes de correlación (*r*) obtenidos entre las matrices. La lámina escurrida presenta valores de correlación medianamente importantes con la lámina precipitada (LP) y con la energía cinética total de los eventos (ECtotal). La lluvia útil superior a 14 mm/h (PU14) presenta relaciones un poco más importantes con el escurrimiento de superficie en los diferentes sitios de medición. Tanto en las parcelas agrícolas como en la microcuenca, los coeficientes de correlación entre la lámina escurrida y la tasa de erosión son más importantes (0.77 a 0.97) que los de la relación lámina precipitada y erosión (0.48 a 0.61). Las mejores correlaciones de la erosión con la intensidad máxima de la lluvia se localizan en el nivel de la intensidad máxima en diez minutos (*I*máx10) en las parcelas agrícolas (0.62 y 0.59) y en la intensidad máxima en treinta minutos (*I*máx30) en la microcuenca (0.67). La energía cinética y la erosión sólo tienen relaciones interesantes en el nivel de la energía cinética total.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación obtenidos en las matrices de eventos de lluvia escurrimiento y erosión en las estaciones de medición.

	Lámina escurrida (LE en mm)				Tasa de erosión (ERO en kg/ha)		
	PB02	**PA23**	**PA67**	**MC**	**PA23**	**PA67**	**MC**
LE (mm)	1 000	1 000	1 000	1 000	**0.768**	**0.975**	**0.897**
ERO (kg/ha)	Sin datos	0.768	0.975	0.789	1 000	1 000	1 000
LP	**0.736**	**0.686**	**0.568**	**0.754**	0.540	0.485	0.610
PU02	0.717	0.675	0.577	0.757	0.557	0.501	0.593
PU04	0.720	0.681	0.572	0.765	0.557	0.501	0.624
PU06	0.730	0.694	0.584	0.778	0.567	0.515	0.652
PU08	0.739	0.702	0.595	0.790	0.574	0.528	0.682
PU10	0.748	0.708	0.604	0.802	0.581	0.536	0.703
PU12	0.753	0.714	0.620	0.811	0.594	0.554	0.715
PU14	0.762	**0.719**	0.639	0.820	0.604	0.573	0.729
PU16	**0.766**	0.716	0.646	0.823	0.609	0.583	0.740
PU18	0.759	0.715	0.661	0.831	0.620	0.600	0.751
PU20	0.757	0.705	**0.675**	**0.836**	**0.626**	**0.614**	**0.756**
*I*máx05	0.596	0.554	0.528	0.570	0.565	0.536	0.611
*I*máx10	0.644	0.594	0.581	0.602	0.618	0.585	0.614
*I*máx15	0.689	0.599	0.584	0.646	0.614	0.579	0.653
*I*máx30	0.744	0.629	0.573	0.668	0.594	0.549	0.666
*I*máx45	0.760	0.633	0.553	0.664	0.574	0.521	0.653
*I*máx60	0.755	0.636	0.523	0.667	0.555	0.485	0.649
EC05	0.485	0.420	0.315	0.444	0.347	0.298	0.432
EC10	0.523	0.449	0.343	0.470	0.379	0.323	0.448
EC15	0.551	0.457	0.348	0.487	0.385	0.325	0.464
EC30	0.586	0.485	0.354	0.493	0.390	0.324	0.466
EC45	0.589	0.484	0.345	0.489	0.381	0.313	0.460
EC60	0.581	0.482	0.333	0.489	0.376	0.299	0.458
ECtotal	**0.792**	**0.709**	**0.669**	**0.799**	**0.624**	**0.603**	**0.670**

No obstante estas correlaciones generales, la ilustración 6 muestra la gran dispersión de valores obtenidos entre las variables pluviométricas y la lámina escurrida. Esta gran variabilidad de respuestas hidrológicas al evento de lluvia es observada también en el nivel de los umbrales de escurrimiento que se presentan posteriormente. Aparentemente, la única excepción de valores medianamente ordenados corresponde a la lluvia útil igual o superior a 20 mm/h (PU20) en el ámbito de la microcuenca.

Esta variabilidad de respuestas hidrológicas impide obtener ecuaciones de regresión que permitan predecir los escurrimientos y la erosión en las parcelas. La realización de modelos de regresión múltiple con el escurrimiento y la erosión (como variables dependientes) y las diferentes variables pluviométricas (como variables independientes) no presentó ajustes importantes.

En cambio, en el nivel de la microcuenca, la ecuación que obtuvo el mejor coeficiente de determinación hace participar la lluvia útil con un umbral de 20 mm/h. Esta ecuación (ilustración 7) presenta un error estándar en la estimación de 0.19 mm/h, con un valor de coeficiente de determinación de 0.861, y tiene la forma siguiente:

$$LE = - 0.48137 + \exp(-0.75919 + (0.059512)PU20)$$

La ecuación de la tasa de erosión en la microcuenca tiene como variables la lámina escurrida y la intensidad máxima de la lluvia en diez minutos (ilustración 8). El error estándar de la estimación es de 0.0127 ton/ha, con un coeficiente de determinación de 0.91 y tiene la forma siguiente:

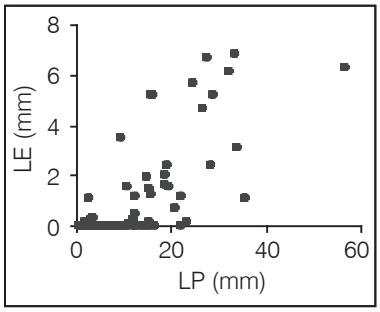
$$ERO = 0.0021\ (LE^{*}I_{máx10}) - 0.0014$$

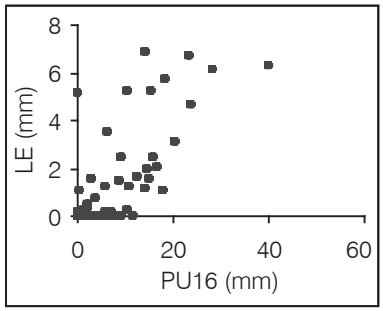
Umbrales registrados del escurrimiento de superficie

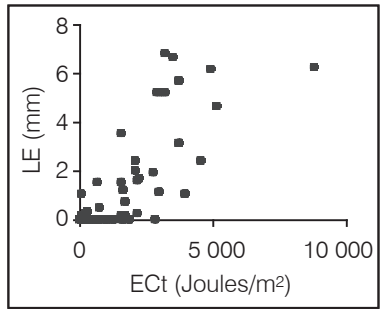
A partir de los registros de precipitación se ha observado que las lluvias por lo general son de corta duración (menores a treinta minutos), y que es en los

Ilustración 6. Comparación de la lámina escurrida con las variables pluviométricas de mayor importancia.

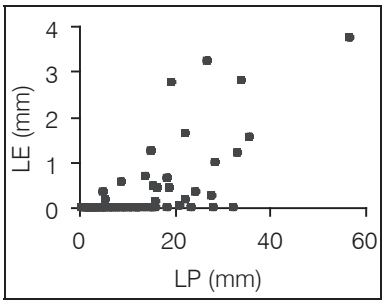
Parcela PB02

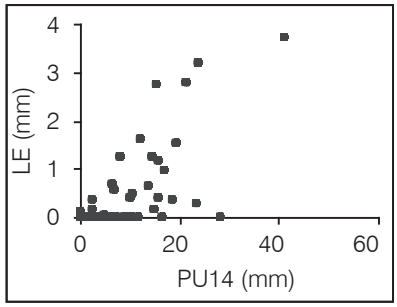


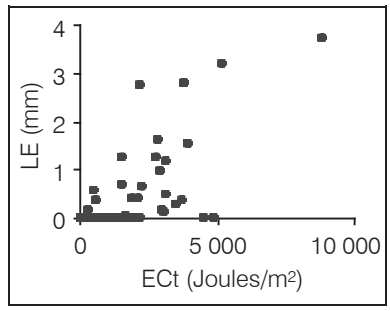




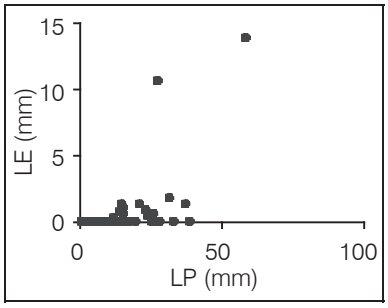
Parcela PA23

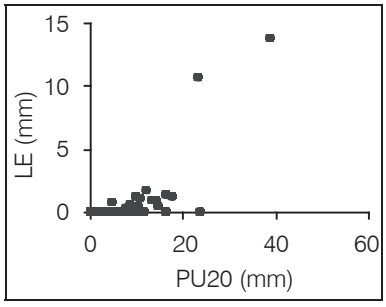


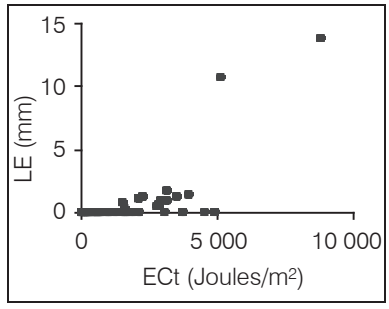




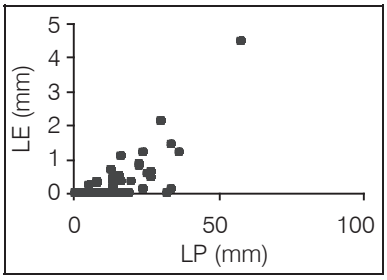
Parcela PA67

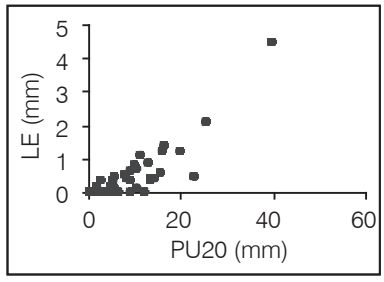


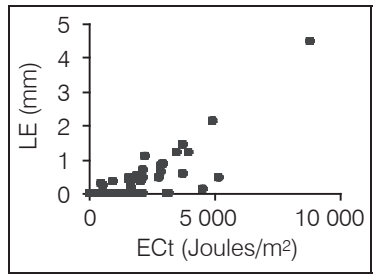




Microcuenca







LE: lámina escurrida; LP: lámina precipitada; PU16, PU14 y PU20, lluvia útil a 16, 14 y 20 mm/h; ECt: energía cinética total.

Ilustración 7. Gráfica de la ecuación del escurrimiento de superficie en el nivel de la microcuenca.

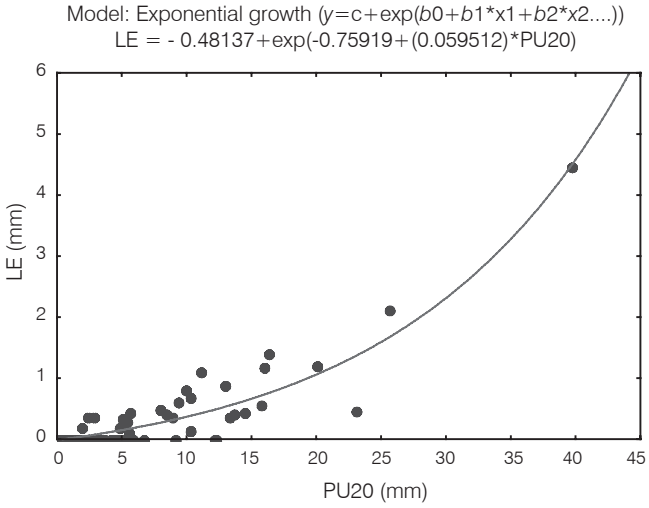
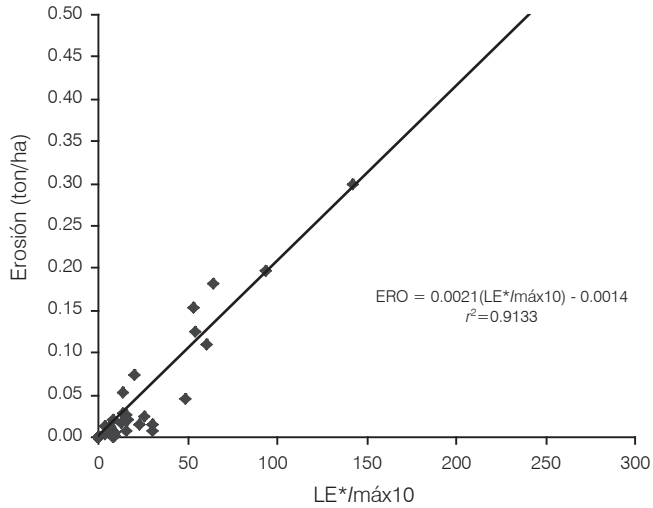


Ilustración 8. Gráfica de la ecuación de tasa de erosión en el nivel de la microcuenca.



Cuadro 3. Umbrales del escurrimiento de superficie en las diferentes estaciones de medición (periodo 2002-2003).

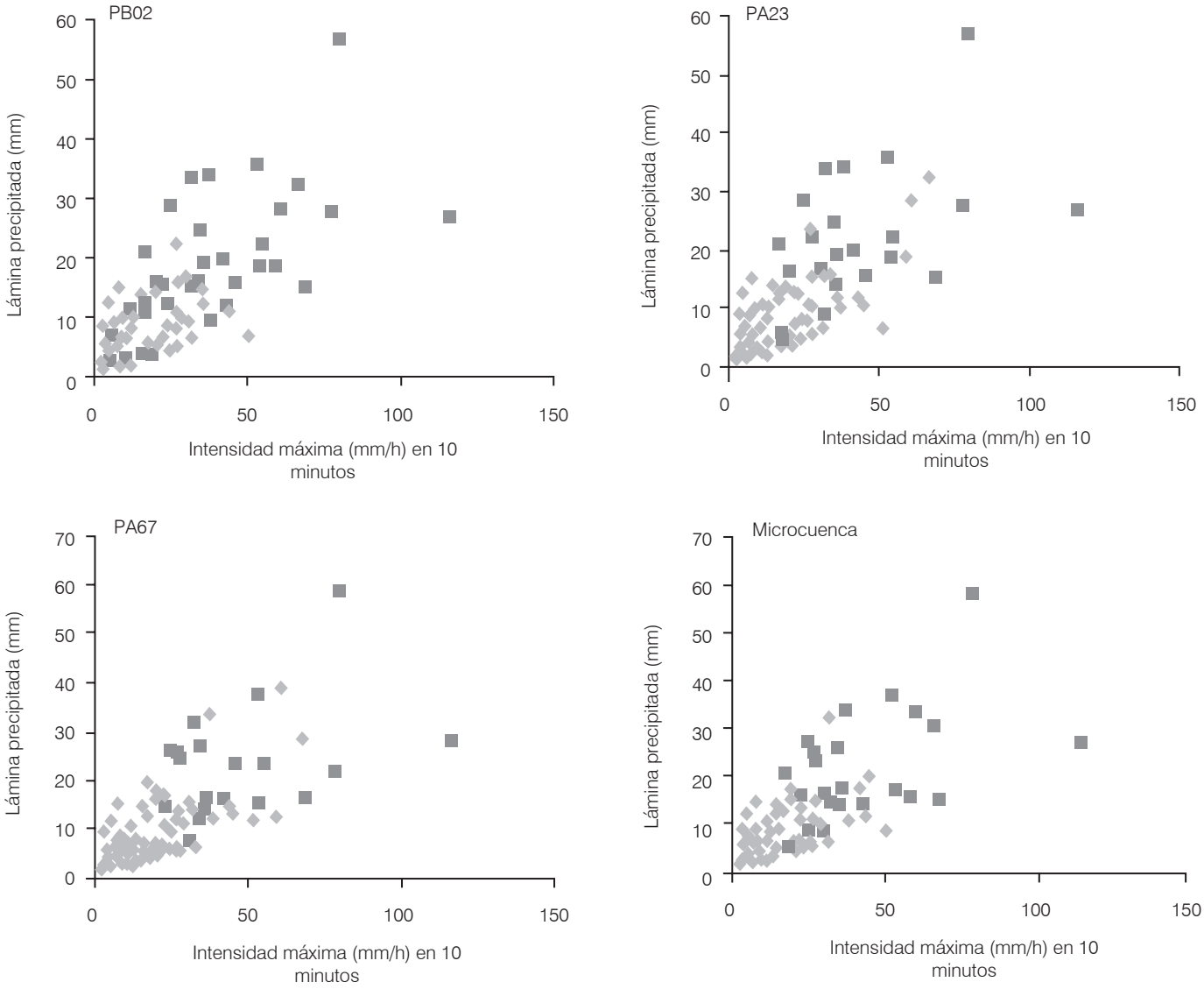
Estación	Límite de la lámina precipitada (mm)	Límite de la intensidad máxima en 10 min (mm/h)
PB02	2.5	5.4
PA23	5.6	17.4
PA67	7.3	22.8
Microcuenca	5.2	17.4

primeros diez minutos cuando se registran las mayores intensidades. Considerando estas observaciones, en el cuadro 3 y la ilustración 9 se presentan los umbrales de escurrimiento de superficie obtenidos en los diferentes puntos de medición. En esta figura se encuentran graficadas la intensidad máxima de la lluvia en diez minutos y la lámina precipitada. Los puntos más oscuros de las gráficas representan los eventos de lluvia que provocaron escurrimientos de superficie; los puntos en gris son las lluvias que no generaron flujos superficiales. Se observa que los rangos del límite de presentación del flujo superficial son más amplios en la parcela forestal sin árboles (PB02) (lámina e intensidad de lluvia mínimas desde 2.5 mm y 5.4 mm/h). En cambio, la parcela agrícola PA67, con menor pendiente, es la que demanda una lámina e intensidad de lluvia más importante para que se presente el escurrimiento de superficie (7.3 mm y 22.8 mm/h). En el nivel de la microcuenca, los valores mínimos de intensidad y lámina precipitada necesarios para la formación del escurrimiento son muy similares a los de la parcela agrícola PA23 (5.2 mm de lámina precipitada e intensidad de 17.4 mm/h). En la microcuenca, según los datos observados, los valores de mayor sensibilidad corresponden a eventos del fin de agosto y septiembre. Aparentemente, aun con gastos específicos menores, la salida de la microcuenca podría presentar un grado de mayor sensibilidad al escurrimiento en la segunda mitad de la temporada de lluvias.

Discusión

En esta zona de estudio, el escurrimiento de superficie no es muy grande. En el mayor de los casos, el coeficiente de escurrimiento no llegó al 5% (PB02) y en la zona de bosque, el escurrimiento de superficie no existe. Esto puede ser explicado en función de la gran capacidad de infiltración de los suelos de tipo andosol de la zona. Se puede decir que el funcionamiento hidrológico está regido en mayor parte por escurrimientos subterráneos, que pueden confirmarse con la presencia de abundantes manantiales. Esto significa que la principal forma de escurrimiento no sea de tipo Horton (1940) debido a la saturación de la superficie del suelo (en este caso, el escurrimiento no es provocado por la diferencia entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración del suelo), sino de

Ilustración 9. Umbrales de lámina precipitada e intensidad de precipitación en las parcelas y la microcuenca experimental.



tipo Cappus (1960) o Hewlett (1961 y 1972); en el área de estudio, el escurrimiento de superficie se desarrolla en el suelo saturado (no sólo superficial), a partir de áreas preferenciales contributivas con altos contenidos de humedad. La diferencia en ambos tipos de formación del escurrimiento de superficie está tratada en los trabajos de Dunne (1978), Ambroise (1998) y Musy (2004).

En las zonas boscosas, el dosel de los árboles retiene en promedio el 16% de la lluvia y puede retener hasta 11 mm de lámina precipitada en un solo evento. Estos valores anuales de intercepción son similares a los observados en bosques tropicales de Surinam (Jackson 1975, citado por Musy, 2004), pero muy diferentes a los bosques templados (valor anual de intercepción superior al 20%) y de las zonas semiáridas cubiertas (valor anual intercepción inferior a 13%) (Musy, 2004). Además, la precipitación que logra atravesar el follaje de los árboles llega con una energía cinética disminuida (sobre todo porque los pinos del área de estudio tiene un dosel muy bajo, a menos de tres metros del suelo). Por otro lado, los suelos mantienen una cubierta de mantillo de más de 10 cm y una estructura que facilita la infiltración. Sin embargo, una vez que los árboles y el mantillo que cubre el suelo se han perdido, los sitios descubiertos pueden convertirse en importantes zonas productoras de escurrimientos (más aún que en las parcelas agrícolas). Aparentemente, en estos sitios no se producen grandes cantidades de erosión gracias a que los suelos se

encuentran aún cubiertos por la vegetación natural secundaria y porque si estos suelos no son perturbados, entonces pueden mantener una resistencia importante a la erosión (Duchaufour, 2001). Las parcelas agrícolas presentan condiciones medias de escurrimientos de superficie, pero las más altas tasas de erosión. En estos suelos, los trabajos agrícolas tradicionales facilitan la infiltración; sin embargo, la pendiente juega un papel muy importante. Las observaciones demuestran que un aumento de 9 a 27% de pendiente puede doblar la tasa de erosión. Estas observaciones coinciden con los resultados de Fontes *et al*. (2004) y Austero *et al*. (2004) en las Islas Azores. Los andosoles tienen propiedades físicas muy diferentes bajo una cubierta vegetal (el suelo se mantiene unido en una sola unidad) que en condiciones de degradación (los andosoles cambian su estructura y son muy frágiles a la erosión hídrica). La mayor producción de escurrimientos de superficie en las zonas deforestadas sin mantillo puede ser una de las características particulares de los suelos del área de estudio. En efecto, estos resultados no coinciden con los valores de tablas utilizadas comúnmente en los cálculos de escurrimiento y erosión de los manuales oficiales basados en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS).

No obstante estas conclusiones generales, en el área de estudio se observa una gran variabilidad temporal de la respuesta hidrológica a los eventos de lluvia. Las parcelas agrícolas y forestales experimentales no presentaron relaciones directas de ningún tipo entre el escurrimiento y la erosión con ninguna de las variables pluviométricas utilizadas (lámina precipitada, lluvia útil a diferentes valores de intensidad, intensidad máxima de la lluvia y energía cinética a diferentes tiempos específicos). En estas parcelas tampoco fue posible realizar un modelo de regresión múltiple con resultados estadísticamente significativos debido a la gran variabilidad de los datos observados. Esta dispersión de valores de escurrimiento es visible aun en los umbrales de escurrimiento. Sin embargo, en la escala de la microcuenca (50 ha) se logran obtener ecuaciones de explicación del escurrimiento de superficie y de la erosión hídrica. Aparentemente, los suelos de tipo andosol, en la escala de la parcela, pueden presentar una gran variación temporal de sus condiciones de infiltrabilidad; sin embargo, esta variabilidad local temporal puede ser amortiguada en una escala espacial mayor. La presencia de macroporos, las alternancias vegetales, las madrigueras de fauna del suelo y la rugosidad de la superficie juegan un papel importante en la variabilidad de la respuesta hidrológica de superficie.

Bajo las condiciones de la microcuenca (geomorfología, suelos, vegetación y climatología), la variable lluvia útil a 20 mm/h (PU20) puede ser utilizada para predecir los escurrimientos de superficie. Se puede decir también que la lluvia que se presenta a partir de una intensidad igual o superior a 20 mm/h tiene posibilidades de generar escurrimientos. La ecuación de erosión para la microcuenca hace participar las variables lámina escurrida (LE) e intensidad máxima a diez minutos (*I*10). Con estas dos variables es posible determinar los valores de erosión hídrica a esta escala espacial. Los resultados demuestran que la intensidad máxima en treinta minutos (utilizada comúnmente para calcular el valor de la variable *R* en la ecuación universal de pérdida de suelo) no es la mejor variable a utilizar en esta zona de estudio. Esto puede ser explicado debido a que las lluvias de tipo tropical que se presentan en esta zona son tempestivas y de corta duración, por ello la intensidad máxima en diez minutos presentó mejores correlaciones.

Conclusiones

En el área de estudio, el escurrimiento de superficie es poco y en las zonas de bosque puede ser nulo. En los andosoles del área de estudio, los escurrimientos de superficie son más importantes en las zonas deforestadas sin mantillo que en las parcelas agrícolas. Ello podría explicarse debido a las características físicas de los andosoles, los cuales pueden volverse muy infiltrantes con las labores agrícolas; sin embargo, esto también los hace muy frágiles a la erosión.

Basados en mediciones de campo, los resultados de este trabajo demuestran la importancia de conocer los procesos hidrológicos antes de realizar modelaciones basadas en ecuaciones simples. Contrario a las tablas de valores utilizadas comúnmente en la ecuación universal de pérdida de suelo, se demuestra que las zonas de pastoreo producen más escurrimientos que las parcelas agrícolas; además, la intensidad máxima en treinta minutos (utilizada comúnmente para calcular la variable *R* de la EUPS) no resultó ser la mejor variable pluviométrica. En este caso se recomienda el uso de intensidades máximas de menor duración (entre diez y veinte minutos).

El funcionamiento hidrológico está regido en mayor parte por escurrimientos subterráneos, lo que hace pensar en una forma de escurrimiento de tipo Cappus (1960) o Hewlett (1961 y 1972): el escurrimiento de superficie se desarrolla a partir de áreas preferenciales contributivas cuando está saturado todo el perfil de suelo (a diferencia de la forma de escurrimiento de tipo

Horton, en donde el escurrimiento sólo demandaría la saturación de la superficie del suelo). La localización y el funcionamiento de estas áreas contributivas podría ser el objeto de trabajos futuros. Los modelos de escurrimiento a realizar deberán considerar este proceso hidrológico.

En el nivel de la parcela, los eventos de escurrimiento de superficie presentan una gran variación temporal que no puede ser explicada solamente a partir de las características de la lluvia. La conductividad hidráulica de los andosoles a esta escala podría ser muy variable. En cambio, en el nivel de la microcuenca (50 ha), las ecuaciones obtenidas permiten explicaciones de la formación del escurrimiento y de la erosión hídrica.

La erosión se presenta particularmente en las zonas agrícolas y la pendiente es el factor determinante del suelo perdido. La pérdida de sedimentos es provocada por las lluvias de mayor intensidad (muy pocos eventos de lluvia pueden ser los responsables de la mayor parte de la erosión anual).

Considerando la importancia hidrológica de la zona de estudio es necesario realizar trabajos de conservación de cuencas, en los cuales se recomienda incluir, además de las actividades tradicionales de reforestación y conservación de suelos, las siguientes acciones:

- Limitar los trabajos agrícolas hasta pendientes menores al 20% (pues los trabajos agrícolas en pendientes serían los mayores productores de sedimentos).
- Reforestar con especies que generen una cubierta de mantillo suficientemente gruesa que permita una infiltración mayor. Si las zonas deforestadas son las mayores productoras de escurrimientos de superficie, es importante considerar especies vegetales que protejan la superficie del suelo (con el mantillo) y mejoren las condiciones de infiltrabilidad.
- Reducir la velocidad del escurrimiento de superficie en zonas de praderas (con barreras vivas, por ejemplo), pues estas áreas son las principales productoras de escurrimientos de superficie.

Recibido: 28/11/2006
Aprobado: 09/08/2007

Referencias

AMBROISE, B. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1 - Processus et facteurs. *Revue de sciences de l'eau*. No. 4, 1998, pp. 471-495.

AUXTERO, E., MADEIRA, M. and SOUSA, E. Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *CATENA journal*. Vol. 56, 2004, pp. 45-154.

CAPPUS, C. Bassin expérimental d'Alrance. Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche, revue internationale de l'eau*. No. A, 1960.

CNA-SEMARNAT. *Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos*. México, D.F.: CNA, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, 2001, 47 pp.

DESCROIX, L. y NOUVELOT, J.F. *Escurrimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental*. Gómez Palacio, México: publication ORSTOM-INIFAP, 1997, 50 pp.

DUCHAUFOUR, P. Introduction à la science du sol. 6ème édition de l'Abrégé de pédologie. Paris: DUNOD Editeur, 2001, pp. 203-206.

DUNNE, T. Fields studies of hillslope flow precesses. In: *Hillslope Hydrology*. M.J. Kirkby. New York: Ed. John Wiley, 1978, pp. 227-293.

EGUCHI, S., HASEGAWA, S. Non-uniform water and solute movement through a structured andosol profile. Thailand: WCSS, 2002, 20021673 / pp. 1-8.

ETCHEVERS, J.D. *Un cuarto de siglo de investigación en los suelos volcánicos de México*. Serie Cuadernos de Edafología 1. México, D.F.: Colegio de Postgraduados. 1986.

FAO. *Field measurement of soil erosion and runoff*. Bulletin 68. Rome: FAO, 1997, 52 pp.

FONTES, J.C., PEREIRA, L.S. and SMITH, R.E. Runoff and erosion in volcanic soils of Azores: simulation with OPUS. *CATENA journal*. Vol. 56, 2004, pp. 199-212.

GUEDEZ, P.Y. Déforestation et érosion dans la Sierra Madre Occidentale. Mémoire de fin d'études ISTOM-ORSTOM, Cergy-Pontoise, France, 1996, 98 pp.

HEWLETT, J.D. *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watershed*. Asheville, USA: US forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1961.

HEWLETT, J.D. Reply on effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Wat. Resour. Res*. Vol. 8, no. 1, 1972, pp. 171-172.

HORTON, R.E. An approachtoward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc*. Vol. 5, 1940, pp. 399-417.

HUDSON, P.F. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico. CATENA journal. Vol. 52, 2003, pp. 57-76

MUSY, A. *Hydrologie, une science de la nature*. Coll. Gérer l'environnement. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et universitaires Romandes, 2004, 314 pp.

OMM. *Evaluación de un recurso precioso... el agua*. No. 81. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, 1994.

PINHEIRO, J., TEJEDOR-SALGUERO, M. and RODRIGUEZ, A. Genesis of placic horizons in Andisols from Terceira Island Azores-Portugal. *CATENA journal*. Vol. 56, 2004, pp. 85-94.

RODAS-CIFUENTES, A., NUNEZ-ESCOBAR, R., ESPINOSA-HERNANDEZ, V., ALCANZAR GONZALEZ, G. Asociación Lupino-Maíz en la nutrición fosfatada en un andosol. *Revista Terra*. Vol. 19, 2001, pp. 141-154.

RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, A., ARBELO, C.D., GUERRA, J.A., MORA, J.L., NOTARIO, J.S., ARMAS, C.M. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosol. *CATENA journal*. Vol. 66, 2006, pp. 228-235.

SEDOV, S.N., SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. and GAMA-CASTRO, J.E. Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *CATENA journal*. Vol. 54, 2003, pp. 495-513.

VIRAMONTES, D., DUWIG, C., ESTEVES, M., ROJAS ROJAS, F., LAPETITE, J.M. y DE LEÓN MOJARRO, B. Instrumentación de una microcuenca experimental. *Anuario 2003*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2004, pp. 129-135.

VIRAMONTES, D., ROJAS ROJAS, F., DUWIG, C. y ESTEVES, M. *Caracterización hidro-erosiva de suelos de tipo andosol e importancia de este recurso en el estado de Michoacán. Las ciencias del agua en Morelia, aplicaciones frente a los retos del siglo XXI*. Morelia, México: Universidad de Michoacán, 2005, pp. 98-110.

WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. Predicting soil losses: A guide to conservation planning. *USDA. Agric. Handbook*. No. 537, 1978.

ZEHETNER, F. and MILLAR, W.P. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *CATENA journal*. Vol. 65, 2006, pp. 201-213.

Abstract

VIRAMONTES, D., ESTEVES, M., DESCROIX, L., DUWIG, C., ROJAS-ROJAS, F., GUTIÉRREZ, A. & DE LEÓN-MOJARRO, B. Quantification of runoff and erosion in an experimental andosol watershed in Valle de Bravo. Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. XXIII, no. 3, July-September, 2008, pp. 89-103.*

This work shows the results of the quantification of runoff and erosion in an experimental andosol watershed in the Mexican Neo-volcanic Axis at Valle de Bravo, in the State of Mexico. The results of the modelling from rain variables demonstrate that at the experimental plots scale, runoff events display a great temporary variation of the hydrologic response. At the watershed scale (50 ha), the resulting equations help explain runoff and erosion. Runoff is explained by the rainfall amount with an intensity equal or higher than 20 mm/h. The erosion rate is explained according to the variables of runoff depth and maximal intensity in 10 minutes. Soil loss is caused by rains of higher intensity (very few rain events produce most of the annual erosion). The results of the quantification, location of thresholds, and modelling demonstrate that runoff is very weak and, in closed forests, it can be nil. It is also demonstrated that the zones of greater production of runoff are the prairies, but with smaller rates of erosion. However, agricultural zones with weak runoff, display very important erosion rates and the slope is the determining factor of the lost soil. Andosols are very resistant when they are not disrupted, but can be very fragile in conditions of degradation.

Keywords: watershed, plots, runoff, rain erosion, andosol, rain variables, Valle de Bravo, Mexico.

Dirección institucional de los autores:

David Viramontes

Laboratoire de Géographie Physique
Unité Mixte de Recherche 8591 du CNRS
1 place Aristide Briand
92 195 Meudon Cedex, Fance
viramontesdavid@yahoo.fr

Michel Esteves

Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
1023, rue de la Piscine, Domaine Universitaire. BP 53
38 041 Grenoble, Cedex 9, France
teléfono: + (33) (0) 476 82 50 00
michel.esteves@hmg.inpg.fr

Luc Descroix

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
B.P. 11416, Niamey, República de Niger
teléfono: + (227) 75 2610
descroix@ird.ne

Celine Duwig

Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
1023, rue de la Piscine, Domaine Universitaire. BP 53
38 041 Grenoble, Cedex 9, France
teléfono: + (33) (0) 476 82 50 00
celine.duwig@hmg.inpg.fr

Fernando Rojas-Rojas
Alfonso Gutiérrez
Benjamín de León-Mojarro

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfono: + (52) (777) 329 3600
agutierrez@tlaloc.imta.mx
bleon@tlaloc.imta.mx