

COMPORTAMIENTO HIDROLOGICO DE LOS SUELOS SOBRE ARENISCAS. SERRA DE LA CALDERONA, VALENCIA

A. CERDÀ

Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium.
Landscape and Environmental Research Group
Universiteit van Amsterdam
Nieuwe Prinsengracht 130, 1018 VZ, Amsterdam, Holanda

Resumen. Los resultados obtenidos con lluvia simulada e infiltrómetro de cilindro demuestran que en las áreas semiáridas existen ambientes con elevadas capacidades de infiltración. En la Serra de la Calderona, un paisaje típico Mediterráneo desarrollado sobre areniscas del Bundtsandstein, los suelos se caracterizan por una elevada conductividad hidráulica como demuestran las mediciones realizadas con infiltrómetro de cilindro (958 mm h^{-1}). Esto explica que las lluvias de elevada intensidad (55 mm h^{-1}) no produzcan escorrentías superficiales significativas. A pesar de ello, en la zona de estudio son normales caudales importantes en los cauces durante eventos de magnitudes semejantes a las anteriores.

Estos resultados indican que la producción de escorrentía en la zona puede ser fruto del flujo subsuperficial, el cual puede ser favorecido por la elevada conductividad hidráulica de los suelos (arenosos), por la existencia de un horizonte argílico en profundidad que durante la estación seca presenta abundantes macroporos, o bien por el propio contacto entre el horizonte orgánico (80 % de contenido en arena) y el horizonte argílico (> 30 % de arcilla).

Sea cual sea el mecanismo que produce este flujo subsuperficial rápido es de destacar que en ambientes semiáridos también existen suelos con una elevada capacidad de almacenamiento y transmisión de agua y que los modelos de producción de escorrentía encontrados en las regiones templadas pueden trasladarse a algunas áreas de los ecosistemas mediterráneos.

En estos casos, la erosión superficial vía arroyada es muy reducida, siendo los flujos subsuperficiales los que controlen las morfologías de las laderas.

Palabras clave: Hidrología, Laderas, Escorrentía, Erosión, Lluvia Simulada

Abstract. The results obtained by simulated rainfall and cylinder infiltrometer indicated that in the semiarid regions exist soils with high infiltration capacities. In the Serra de la Calderona, a typical Mediterranean landscape on sandstone of Bundtsandstein formation is developed, the soils are characterised by a high hydraulic conductivity with rates up 958 mm h^{-1} recorded by cylinder infiltrometer. This explain the response to

4 Cerdà

precipitation with a high intensity (55 mm h^{-1}), which do not produce superficial runoff. However, in the study area, discharges in the main streams during events of similar magnitudes exist.

This results indicate that the runoff in the area may be produced by a subsurface flow, which is favoured by the high hydraulic conductivity of the soils (sandy soils), the existence of a clay horizon in depth which during the dry season contains a large abundance of macropores, and the contact between the organic horizon (80 % of sand content) and the clay horizon (> 30 % of clays).

Independently of the mechanism that produce this subsurface flow is necessary to emphasise that in the semiarid environments also exist soils with an elevate storage capacity with subsequent subsurface waterflow. In that case, the models of runoff production found in regions of temperate climates can be used in the Mediterranean ecosystems.

At these cases, erosion produced by the runoff must be very low, being the subsurface flows which control the slopes morphology.

Key words: Hydrology, Slopes, Runoff, Erosion, Simulated Rain

1. Introducción

Durante las últimas seis décadas, uno de los temas más apasionantes abordados por la hidrogeomorfología ha sido el de los modelos de producción de escorrentía (Burt, 1985). Los modelos propuestos pretenden explicar como se produce la escorrentía en las laderas, así como los mecanismos que permiten que ésta alcance los cauces (Ward, 1975; Burt, 1987).

Sin duda, el pionero en la modelización de la generación de escorrentía fue Horton (1933, 1940), el cual atribuía a la superación de la capacidad de infiltración de los suelos por la precipitación el origen de toda el agua escurrida, aumentando por ello el caudal ladera abajo. Este modelo de producción de escorrentía era, y es en la actualidad, el utilizado en múltiples estudios sobre pérdida de suelo, y el que originó en gran medida el "boom" de mediciones directas de erosión sobre parcelas en los años 50 y 60 en EE.UU. (Whischmeier & Smith, 1978).

En los años 60 surgieron dos nuevos modelos que explican la generación de escorrentía de forma muy distinta. En el denominado "*partial area model*" (Betson, 1964), eran sólo las superficies de las partes bajas de las laderas las que producían escorrentía debido a la saturación, mientras que el "*variable source area model*" (Hewlett, 1961; Hewlett & Hibbert, 1967) se basa en la escorrentía subsuperficial para explicar la escorrentía rápida y directa al cauce.

Posteriormente surgieron estudios en áreas semiáridas (Yair & Lavee, 1985), los cuales explicaron comportamientos específicos, así como variaciones muy significativas de los anteriores modelos.

En resumen, en las últimas décadas se ha pasado de creer que la escorrentía se generaba de forma Hortoniana, es decir, directamente sobre la superficie del suelo, a pensar que ésta se produce subsuperficialmente en las regiones templadas (Bernier, 1985).

Por el contrario, a los paisajes de clima semiárido como los mediterráneos, siempre se les ha relacionado con suelos poco desarrollados, bajas capacidades de infiltración y umbrales de producción de escorrentía muy bajos (Shick, 1970; Evenary et al., 1971; Ward, 1975; Shick, 1977; Yair & Danin, 1980; Thornes, 1980; Scoging, 1982; Yair, 1983). Esto es debido básicamente a las bajas coberturas vegetales, al fuerte encostramiento superficial y al reducido desarrollo edáfico de los suelos (Scoging & Thornes, 1982), además de la mayor intensidad de las precipitaciones en áreas semiáridas (Yair & Lavee, 1985).

Hasta el momento, los estudios sobre modelos de producción de escorrentía se han llevado a cabo básicamente en medios templados, y sólo durante la década de los 80 surgieron nuevos avances en las áreas semiáridas, esencialmente Israel. Los resultados hicieron dudar también allí sobre la validez del modelo Hortoniano, desarrollándose una variante del modelo de área parcial (Yair & Lavee, 1985).

Pero esta generalización de la respuesta ante la lluvia de lo que es uno de los ecosistemas más diversos del planeta, el mediterráneo, supone una simplificación de los procesos hidrológicos que en él acontecen. Concretamente, en el País Valenciano, aunque la existencia de zonas degradadas es importante, incluso con paisajes de badlands (Harvey & Calvo, 1991; Calvo et al., 1991) hay ambientes donde las coberteras vegetales y el desarrollo edáfico son elevados. Destacan las áreas forestales de las montañas interiores (Font Roja, Desert de les Palmes, Montgó, Caroig, etc.), zonas de matorral muy desarrollado con cubiertas de *Quercus ilex*, *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*, etc. muy densas.

Especialmente los suelos sobre areniscas presentan condiciones muy peculiares, creando conjuntos paisajísticos paradigmáticos en el entorno mediterráneo: Serra d'Espadà, Serra de la Calderona y Desert de les Palmes.

En cuanto a la hidrología superficial de las cuencas de drenaje desarrolladas sobre areniscas, básicamente areniscas del Bundtsanstein, existe muy poca información. Tan sólo se conocen algunas mediciones de escorrentía a partir de lluvias naturales (Bernard et al., 1988; Calvo, 1992), y que son suelos muy estables a pesar de sus elevadas pendientes (Calvo, 1987).

El objetivo de este trabajo es aportar información sobre la hidrología superficial de los suelos sobre areniscas mediante experimentos con lluvia simulada y mediciones con infiltrómetro de cilindro, lo que nos permitirá predecir su comportamiento ante la lluvia natural.

2. Zona de estudio

En la parte más septentrional de la provincia de Valencia, concretamente al norte del término municipal de Puçol, pero formando parte del de Gilet, se encuentra el Barranc de Llopis, en cuya cuenca de drenaje (toda ella sobre areniscas ortocuarcíticas del Bundtsanstein) se han seleccionado tres laderas y una vaguada para estudiar mediante lluvia simulada el comportamiento hidrológico de los suelos.

El clima de la zona está caracterizado por temperaturas suaves en invierno (10°C de media en enero) y altas en verano (24°C en agosto), coincidiendo con el periodo más árido y, por lo tanto, con el agostamiento de la vegetación herbácea.

La cubierta vegetal es muy abundante (80-90 %) y está dominada por el matorral (*Pistacia lentiscus*, *Erica multiflora*, *Juniperus oxycedrus*, *Chamaerops humilis* y *Rhamnus alaternus*), junto a *Brachypodium retusum* y *Pinus halepensis* de forma esporádica.

La laderas presentan fuertes pendientes (30°) y perfiles convexo-recto-convexos o bien convexo-rectos (Calvo, 1987), existiendo en general morfologías suaves que esencialmente corresponden a zonas deprimidas y realzadas (*hollows* y *spurs*).

Los suelos se caracterizan por estar cubiertos, además de por la densa vegetación, por una capa de hojarasca, musgos y líquenes, junto a una importante pedregosidad de gran tamaño (el 90 % son bloques mayores de 20 cm de diámetro). Los suelos presentan un horizonte orgánico muy potente (30-50 cm), de textura muy arenosa (80 % de arena), con un elevado contenido de materia orgánica (2,75-7,02 %), y con pocos carbonatos (menos del 4%).

El horizonte B presenta una acumulación de arcillas (Bt), mayor al 30 % en todos los casos, reduciéndose el contenido de materia orgánica y carbonatos respecto al horizonte superior (Ah) en más del 50 %. En algunos puntos aparecen acumulaciones de margas amarillentas en la base del horizonte Bt, las cuales son fruto de la contaminación de los materiales del Bundtsanstein por arcillas del Keuper, como lo demuestra el mayor contenido de arcillas (49 %) y de carbonatos (10 %), así como el color 2.5 Y 7/8.

Tanto las variaciones estacionales como espaciales de la morfología superficial de los suelos son insignificantes. Solamente es de destacar el agostamiento de la vegetación y la incorporación de nueva hojarasca, no existiendo cambios en las grietas o en cualquier otra característica morfológica (Cerdà, 1993a).

El horizonte Ah presenta una agregación muy pobre, mientras que el horizonte Bt tiene una estructura poliédrica, muy dura en seco, que favorece la formación de macroporos durante la estación seca.

Los suelos han sido clasificados como arenosoles álbicos, aunque con ellos van asociados litosoles en las cumbres, y luvisoles en las partes bajas y medias de las laderas (ver figura 1).

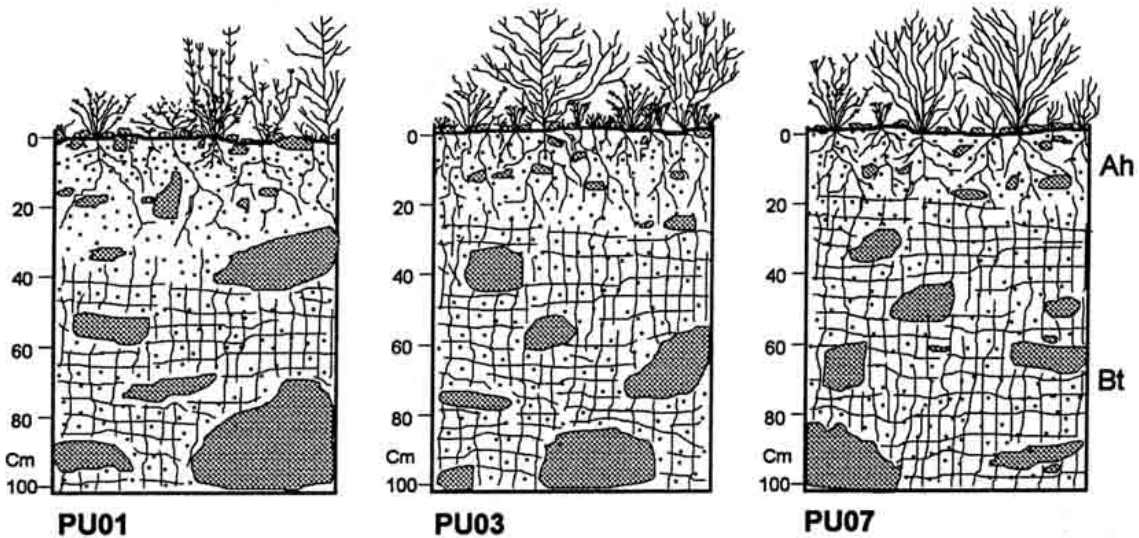


Figura 1. Perfiles de los suelos sobre areniscas del Bundtsanstein en la Serra de la Calderona (Soil profiles on Bundtsanstein sandstone in Serra de la Calderona).

3. Métodos y técnicas

Para conocer el comportamiento hidrológico de los suelos se llevaron a cabo experimentos con lluvia simulada y mediciones con infiltrómetro de cilindro. Previamente se realizaron distintos croquis geomorfológicos, la descripción de los perfiles de los suelos y un inventario florístico de la zona, así como la descripción con gran detalle de la superficie del suelo: pedregosidad y posición de ésta en el suelo, encostramiento y su espesor, grietas, y cobertera vegetal (líquenes, hojarasca, plantas y musgos). Se eligieron para los experimentos las superficies más representativas.

En el horizonte superior se formaron dos muestras para determinar la humedad del suelo, una entre 0-2 cm y otra entre 4-6 cm, y una tercera mediante anillo entre 0-6 cm para conocer la densidad del suelo. Sólo se muestreó el horizonte superficial, ya que el proceso de infiltración afecta básicamente a la superficie del suelo, aunque se realizaron distintas calicatas con el fin de caracterizar todo el perfil.

De las muestras de suelo tomadas a distintas profundidades se determinaba la humedad del suelo por gravimetría. Además, se ha medido el contenido en materia orgánica (Walkley-Black), la textura (USDA), el carbonato cálcico (calcimetría de Bernard), y el color en seco (Munsell chart) de todas las muestras.

La lluvia producida tiene una intensidad de 55 mm h^{-1} , aunque en ocasiones se ha aumentado ésta a 110, 120 y 180 mm h^{-1} con el fin de conocer la respuesta de los suelos ante lluvias más intensas. El simulador de lluvia utilizado es del tipo pulverizador (Hudson, 1982), es portátil y abarca una superficie de más de 1 m^2 , aunque las mediciones se realizaron exclusivamente sobre el cuarto central. La boquilla utilizada es la misma que la empleada por el diseño de Calvo et al., (1988) y remodelado en Cerdà (1993b).

Para el diseño experimental se seleccionaron siete parcelas fijas en las que se hizo un seguimiento de los cambios estacionales en la respuesta del suelo a la lluvia simulada. En verano se realizaron experimentos destinados a conocer la variabilidad espacial de la infiltración, para lo cual se colocaron 20 parcelas a lo largo de una ladera (*hollow*), cubriéndose con ello todos los tipos de superficies existentes.

Comportamiento hidrológico sobre areniscas 7

La lluvia simulada siempre se ha producido con agua desionizada con el fin de eliminar la interferencia de las sales sobre la respuesta hidrológica de los suelos, y para mantener la homogeneidad química de la lluvia. Este aspecto es especialmente importante en suelos desarrollados en climas semiáridos (Imeson y Verstraten, 1988). La intensidad de la lluvia más utilizada en esta investigación es de 55 mm h^{-1} , la cual está de acuerdo con chaparrones con períodos de recurrencia entre 5 y 10 años para el País Valenciano. Las intensidades de lluvia superiores se han conseguido con la utilización de dos o tres boquillas al mismo tiempo. La intensidad del chaparrón tipo de una hora con un periodo de recurrencia de 10 años es de 110 mm h^{-1} en la zona de estudio según Elías y Ruiz (1977).

Tabla 1. Características de los suelos de las siete parcelas permanentes. Muestra superficial (0-2 cm). MO, Materia orgánica (%), Ar, Arena (%), Li, Limo (%), Ac, Arcilla (%), Ca, Carbonato cálcico (%).
Soil characteristics at the seven permanent plots. Surface sample (0-2 cm). MO, Organic matter (%), Ar, Sand (%), Li, Silt (%), Ac, Clay (%), Ca, Calcium carbonate (%).

Profundidad (0-2 cm)

PARCELAS	MO (%)	Ar (%)	Li (%)	Ac (%)	Ca (%)
PU01	3,01	85,46	12,22	2,32	5,30
PU02	7,02	79,15	15,87	14,27	5,20
PU03	6,08	59,14	18,06	22,80	7,00
PU04	6,08	79,18	7,20	13,62	6,30
PU05	2,75	77,46	19,15	3,40	2,99
PU06	6,54	83,20	10,92	5,88	3,45
PU07	7,65	77,54	12,21	10,25	3,65

En los experimentos, el caudal de la escorrentía se mide cada minuto, hasta que se consigue la estabilidad de ésta, si bien normalmente la duración de la lluvia era de una hora como mínimo.

Los cambios en la superficie del suelo eran medidos como tiempo transcurrido desde el inicio del experimento: encharcamiento (tp), inicio de la escorrentía en la superficie del suelo (te), cierre de grietas (tg), salida de la escorrentía en el colector (tes) y el fin de ésta como tiempo desde el fin de la precipitación (tef)

Para el tratamiento de la información es conveniente ajustar los datos reales de la escorrentía a ecuaciones que definan el proceso con claridad para poder obtener parámetros fiables. Un ejemplo puede ser la ecuación de Horton (1933):

$$i = f_c - (f_o - f_c) e^{-\alpha t}$$

Donde: i = tasa de infiltración instantánea
 f_c = infiltración final o constante
 f_o = infiltración inicial
 t = tiempo
 α = decaimiento exponencial de i

Para más información sobre el uso del simulador de lluvia y las metodologías paralelas utilizadas ver Cerdà, (1993a; 1993b).

8 Cerdà

4. Resultados

4.1. Suelos

En todas las partes de las laderas, pero especialmente en la media y en la baja, las calicatas han mostrado perfiles con un horizonte argílico muy desarrollado, con estructura poliédrica y presencia de cutanes. Como antes se ha comentado, sólo en puntos muy concretos han aparecido acumulaciones de carbonato cálcico, siempre como consecuencia de la contaminación por parte de otros materiales triásicos existentes en la zona: arcillas del Keuper y calizas de Muschelkalk. El horizonte argílico es normalmente muy potente (50-100 cm), observándose un aumento del contenido en arcilla y una reducción de la materia orgánica en profundidad.

Por el contrario, el horizonte orgánico (Ah) es extremadamente arenoso (80 %) y presentando una estructura muy pobre a pesar de los elevados contenidos en materia orgánica (ver tabla 1, 2 y 4). Los agregados de mayor estabilidad aparecen junto a las raíces y son éstas las que les dan mayor coherencia a los primeros centímetros del suelo.

En superficie aparece una capa de hojarasca muy abundante (2-5 cm) en la que en ocasiones hay instalados líquenes y musgos, lo que favorece una mayor protección del suelo.

Tabla 2. Características de los suelos de las siete parcelas fijas. Muestra subsuperficial (0-2 cm). MO, Materia orgánica (%), Ar, Arena (%), Li, Limo (%), Ac, Arcilla (%), Ca, Carbonato cálcico (%).

Soil characteristics at the seven permanent plots. Subsurface sample (0-2 cm). MO, Organic matter (%), Ar, Sand (%), Li, Silt (%), Ac, Clay (%), Ca, Calcium carbonate (%)

Profundidad (4-6 cm)

PARCELAS	MO (%)	Ar (%)	Li (%)	Ac (%)	Ca (%)
PU01	4,25	73,27	22,22	4,51	2,30
PU02	4,15	77,18	14,27	8,55	5,18
PU03	3,23	52,99	11,70	35,31	1,00
PU04	4,02	70,28	17,35	12,37	3,90
PU05	1,80	69,36	17,24	13,40	1,09
PU06	2,12	73,46	14,15	8,40	3,21
PU07	3,98	69,15	10,87	30,27	2,84

En general, la densidad aparente del horizonte superficial es de 1.01 g cm^{-3} , estando normalmente relacionadas las variaciones espaciales de ésta con el contenido en materia orgánica (comparar tablas 3 y 4 con la tabla 5). En el horizonte argílico, la densidad aparente es mayor, variando entre $1,07$ y $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, no habiéndose encontrado ninguna relación directa con las características superficiales del suelo.

En todos los suelos en los que se realizaron experimentos se tomaron muestras de la superficie (0-2 cm) y por debajo de ella (4-6 cm). El análisis de los datos de las siete parcelas fijas ratifica el elevado contenido en arenas del horizonte orgánico, $77,3 \%$ en superficie y $69,4 \%$ a cinco centímetros de profundidad, así como el reducido contenido de arcillas y limos, en ambos niveles del horizonte orgánico (ver tabla 1).

La materia orgánica básicamente se encuentra en los primeros dos centímetros, ya que como se puede ver en las tablas 1, 2 y 4, a 5 cm de la superficie, los valores de este parámetro son normalmente la mitad que a 1 cm de profundidad.

Comportamiento hidrológico sobre areniscas 9

Tabla 3. Características de los suelos de las siete parcelas fijas. D, Densidad (g cm^3), P, Porosidad (%).
Soil characteristics at the seven permanent plots. D, Bulk density (g cm^3), P, Porosity (%)

Profundidad (0-6 cm)

PARCELAS	D (g cm^3)	P (%)
PU01	1,01	61,15
PU02	0,99	61,92
PU03	1,06	59,23
PU04	1,10	57,69
PU05	1,15	55,77
PU06	0,95	63,46
PU07	0,93	64,23

Tabla 4. Características de los suelos de las 20 parcelas móviles. MO, Materia orgánica (%) en la capa superficial (0-2 cm) y subsuperficial (4-6 cm). D, Densidad (g cm^3), P, Porosidad (%).
Soil characteristics at the 20 non-permanent plots. MO, Organic matter (%) at surface (0-2 cm) and subsurface (4-6 cm) layers. D, Bulk density (g cm^3), P, Porosity (%)

Profundidad PARCELAS	0-2 cm MO (%)	4-6 cm MO (%)	4-6 cm (g cm^3)	4-6 cm %
PU10	8,97		1,02	60,77
PU11	6,32	2,32	0,99	61,92
PU12	5,32	2,65	0,98	62,31
PU13	7,65	2,65	1,04	60,00
PU14			1,02	60,77
PU15	5,24	2,64	1,06	59,23
PU16	4,98	2,14	0,99	61,92
PU17	4,67	2,82	1,02	60,77
PU18	8,14	4,32	1,03	60,38
PU19	4,52	2,35	0,98	62,31
PU20	3,95	1,29	0,98	62,31
PU21	6,24	3,21	1,04	60,00
PU22	6,21	3,21	1,03	60,38
PU23	7,21	3,51	0,96	63,08
PU24	6,32	2,94	0,99	61,92
PU25	6,32	3,24	0,98	62,31
PU26	5,02	3,12	1,06	59,23
PU27	5,67	3,02	0,95	63,46
PU28	7,24	5,32	0,96	63,08
PU29	4,62	2,36	1,02	60,77

4.2. Características de las superficies

En las tablas 1, 2, 3, 4 y 5, se presentan las características más importantes de cada una de las superficies en los distintos aspectos: hidrología, erosionabilidad, cubierta, textura, etc. Tanto exposición como pendiente son muy variables, mientras que la cubierta vegetal siempre es muy elevada, siendo la

10 Cerdà

suma de las distintas cubiertas vegetales (líquenes, musgos y plantas) normalmente superior al 100 %. Además, cómo cubierta protectora del suelo es importante la elevada cantidad de piedras, normalmente bloques, los cuales alcanzan más del 35 % de la superficie de las parcelas en término medio, variando entre el 10 y el 100 %. La profundidad del suelo también es muy elevada, ya que exceptuando los casos de las partes altas de las laderas, el resto presentan profundidades superiores a 50 cm.

Los musgos y los líquenes, especialmente los segundos, aparecen prácticamente en todos los ambientes estudiados, viéndose favorecidos por el microambiente generado por las plantas superiores.

Tabla 5. Características superficiales de los suelos. ex, Exposición (°), pen, Pendiente (°), li, Líquenes (%), mu, Musgos (%), pl, Plantas (%), vt, Cubierta vegetal total (%), av, Altura de la vegetación, (cm), ps, Profundidad del suelo (cm), pe, Pedregosidad (%).

Soil surface characteristics. ex, Aspect (°), pen, Slope angle (°), li, Lichens (%), mu, Mosses (%), pl, Plants (%), vt, Total vegetation cover (%), av, Vegetación height, (cm), ps, Soil depth (cm), pe, Stoniness (%).

	ex (°)	pen (°)	li (%)	mu (%)	pl (%)	vt (%)	av (cm)	ps (cm)	pe (%)
PU01	20	22	20	40	20	80	90	100	20
PU02	340	4	0	90	100	190	85	100	20
PU03	95	15	0	0	60	60	35	75	100
PU04	100	18	0	0	25	25	20	55	70
PU05	105	20	35	0	10	45	10	42	90
PU06	20	25	5	10	20	35	20	50	30
PU07	38	25	5	40	100	145	18	60	20
PU10	130	25	0	12	100	112	65	59	45
PU11	114	19	0	15	90	105	42	53	40
PU12	129	14	0	23	100	123	42	65	30
PU13	100	10	0	23	100	123	43	54	20
PU14	121	12	0	54	100	154	62	45	70
PU15	300	4	0	54	100	154	74	42	20
PU16	285	9	0	12	100	112	75	53	32
PU17	320	10	0	13	100	113	79	54	10
PU18	300	18	0	21	100	121	61	100	20
PU19	310	25	0	12	90	102	51	100	25
PU20	120	23	0	13	95	108	70	80	32
PU21	113	21	0	10	100	110	42	91	25
PU22	123	16	0	25	98	123	49	100	28
PU23	100	14	0	25	100	125	49	85	25
PU24	13	14	0	60	100	160	68	49	70
PU25	320	5	0	50	100	150	48	62	25
PU26	245	12	0	15	100	115	45	19	32
PU27	320	12	0	15	100	115	43	75	10
PU28	280	25	0	25	100	125	76	58	25
PU29	290	20	0	15	90	105	48	54	20

4.3. Mediciones con infiltrómetro de cilindro

Las veinte mediciones realizadas con infiltrómetro de cilindro demuestran que los suelos desarrollados sobre areniscas presenta tasas de infiltración muy elevadas. La capacidad de infiltración final estable (f_c) varía entre 705 y 1154 mm h^{-1} , la tasa de infiltración inicial (f_0 , $t = 0$) entre 6097 y 10026 mm h^{-1} y el exponente de la ecuación de Horton (i , forma de la curva) entre 0,31 y 0,67 min^{-1} .

En general, los valores medios de los tres parámetros de la ecuación de Horton nos clasifican estos suelos como de una capacidad potencial de absorber agua muy superior a la de las máximas intensidades de lluvia registradas en la zona de estudio. En concreto, el potencial de un suelo seco en el momento de iniciarse el proceso de infiltración, minuto 0 de la medición (f_0 en la ecuación de Horton), es de 8301 mm h^{-1} , lo que supone un volumen de agua 19 veces superior al total precipitado en un año. Por otra parte, la tasa de infiltración final estable (f_c), entendida como conductividad hidráulica saturada nos muestra un potencial de absorción durante una hora mayor a la precipitación total de dos años.

Las curvas de infiltración presentan unas formas muy similares. Tanto en el gráfico de la figura 3 como en la tabla 6 se presentan todos los resultados. Destaca la existencia de dos familias de curvas, divididas por el umbral de 800 mm h^{-1} de tasa final de infiltración, aunque las formas de las curvas no son muy distintas. Si bien no se ha encontrado ninguna razón directa que explique estas diferencias, pueden estar relacionadas con la profundidad del horizonte argílico.

Tabla 6. Parámetros hidrológicos característicos de los suelos sobre areniscas de la Serra de la Calderona obtenidos mediante el ajuste de la ecuación de Horton a los mediciones realizados con infiltrómetro de cilindro (Hydrological parameters characteristics of the soils on sandstone at Serra de la Calderona obtained by the fitted to the Horton equation to the measurements performed by cylinder infiltrometer).

	f_0 (mm h^{-1})	i (min^{-1})	f_c (mm h^{-1})
PU10	8123,12	0,35	929,34
PU11	7439,88	0,36	1132,47
PU12	7237,39	0,40	1109,21
PU13	9582,09	0,50	1055,85
PU14	7160,42	0,40	958,10
PU15	8892,35	0,39	1008,37
PU16	7393,00	0,31	1066,86
PU17	6097,03	0,45	760,42
PU18	7622,39	0,59	721,05
PU19	9269,85	0,36	1154,92
PU20	8656,50	0,39	1012,94
PU21	9211,78	0,40	914,75
PU22	10707,63	0,39	1094,34
PU23	7360,43	0,54	739,25
PU24	7717,63	0,57	734,89
PU25	7767,65	0,63	705,60
PU26	9238,57	0,42	1102,49
PU27	8949,87	0,67	895,75
PU28	7564,54	0,62	1051,52
PU29	10026,15	0,40	1019,03

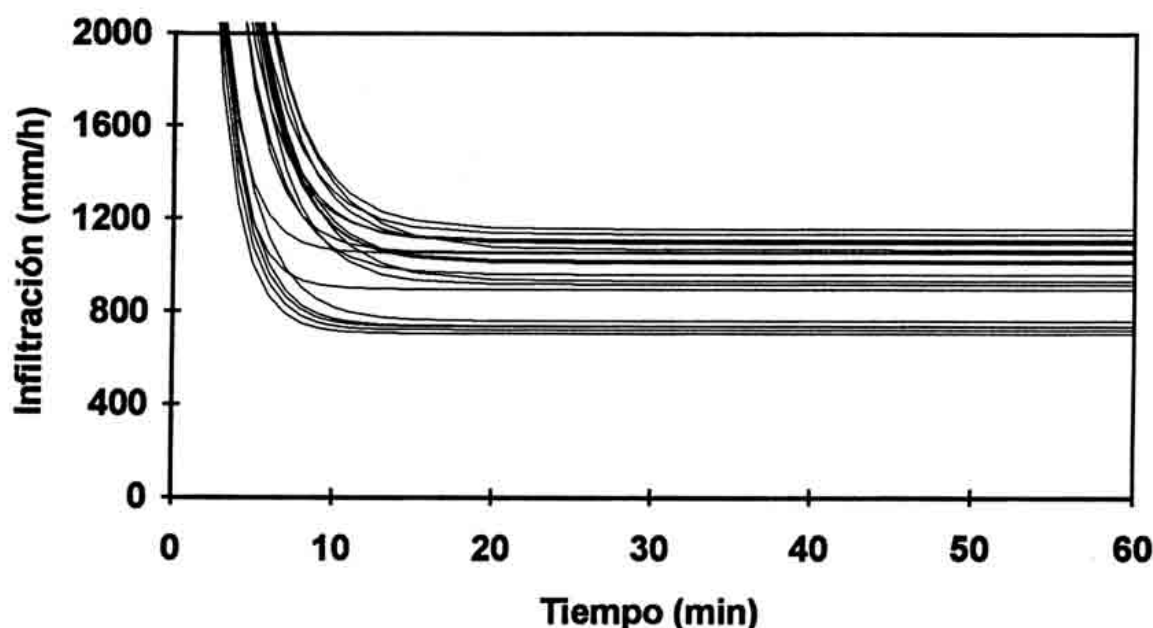


Figura 2. Curvas de infiltración obtenidas con infiltrómetro de cilindro. Ajuste a la ecuación de Horton (Infiltration curves measured by cylinder infiltrometer. Fitted to the Horton equation).

4.4. Experimentos con lluvia simulada

Las pruebas con lluvia simulada se realizaron durante distintas estaciones climatológicas. A pesar de ello, la mayoría de los experimentos corresponden al verano, ya que se pretendía realizar un detallado estudio de la variabilidad espacial de la infiltración a escala de ladera. Los experimentos realizados en las estaciones húmedas sirvieron para evaluar la influencia del agua del suelo sobre el proceso de infiltración.

Los experimentos en verano se realizaron sobre suelos extremadamente secos, durante los meses de julio y agosto de 1990 y 1991. En todos los casos, la humedad superficial que es inferior a 3,7 % en superficie (0-2 cm) y 6,3 % en profundidad (4-6 cm). En cambio, en otras estaciones los suelos presentan valores de humedad superficial de hasta 13,9 % en superficie y 15,3 % subsuperficialmente. También es posible encontrar valores de humedad bajos durante épocas húmedas y frías, lo cual es perfectamente explicable por la textura del suelo (reducido potencial hídrico) y por la elevada biomasa que es soportada por estos suelos, lo que hace que la transpiración pueda contribuir de una forma importante a la pérdida de agua.

Durante las estaciones húmedas la respuesta del suelo ante la lluvia se caracteriza por un rápido encharcamiento: 75 segundos después de iniciarse la lluvia en término medio. Solamente en la parcela PU0702, se ha medido un encharcamiento retrasado (minuto 6,10). La escorrentía aparece rápidamente en superficie (1,2-2,4 min), con la excepción del caso antes mencionado (minuto 8,4).

La medición de la escorrentía en la salida de la parcela es muy variable (1,3-10 min). En todos los casos, excepto en PU0204, la intensidad de la lluvia fue la más baja de las utilizadas (55 mm h^{-1}), y a pesar de ello, la escorrentía fue la mayor que se encontró durante las distintas situaciones estudiadas, lo que se debe a la mayor humedad del suelo en otoño (9 % en superficie) en comparación con el verano (1,6 %).

Durante los períodos secos, la respuesta del suelo ante la lluvia es prácticamente nula, ya que el encharcamiento es muy poco frecuente y el caudal, cuando existe, es insignificante. De los 28

Comportamiento hidrológico sobre areniscas 13

Tabla 7. Respuesta hidrológica y características de los experimentos realizados sobre las 27 parcelas de la Serra de la Calderona. Fecha (año-mes-día), hs, Humedad superficial (%), hss, Humedad subsuperficial (%), d, Duración (min), int, Intensidad de la lluvia (mm h⁻¹), tp, Tiempo de encharcamiento (min), te, Tiempo de inicio de la escorrentía en superficie (min), tes, Tiempo de inicio de la escorrentía en salida (min), tef, Tiempo para el fin de la escorrentía desde la finalización de la lluvia (min). * Sin escorrentía

(Hydrological response and experiments characteristics performed on 27 plots at Serra de la Calderona. Date (year-month-day), hs, Surface moisture (%), hss, Subsurface moisture (%), d, Duration (min), int, Rain intensity (mm h⁻¹), tp, Time to ponding (min), te, Time to surface runoff initiation (min), tes, Time to outlet runoff initiation (min), tef, Time to the end of the runoff from the end of the rain. * Without runoff).

Prueba	Fecha	hs (%)	hss (%)	d (min)	int (mm h ⁻¹)	tp (min)	te (min)	tes (min)	tef (min)
PU0101	900608	5,8	6,3	60	55	4,30	6,31	7,00	0,32
*PU0102	900726	1,6	1,4	60	55	25,0			
*PU0103	900819	1,0	2,0	60	55	30,0			
PU0104	901209	13,9	6,6	60	55	1,10	1,20	1,30	0,45
*PU0201	900608	5,3	4,0	60	55				
*PU0202	900726	0,8	1,9	60	55	4,14			
*PU0203	900819	1,3	2,3	75	55	45,0			
PU0204	901209	13,2	5,0	60	120	1,0	1,30	2,30	1,30
PU0301	900727	1,0	1,9	60	180	3,0		5,30	1,02
PU0302	900818	1,3	2,5	60	55				
PU0303	901209	3,0	3,5	30	55	1,10	2,20	3,15	
PU0401	900727	2,0	1,1	60	180	3,30		5,00	0,52
*PU0402	900818	2,0	0,0	60	55				
PU0403	901209	7,2	15,3	30	55	1,0	1,30	2,00	
PU0501	900727	0,4	0,6	34	180	1,20		2,45	0,30
*PU0502	900818	0,4	0,0	34	62				
PU0503	901209	5,9	3,6	30	55	1,00	1,30	2,00	
*PU0601	900817	2,0	2,0	30	55				
PU0602	901209	12,3	13,7	30	55	1,30	2,40	4,00	
*PU0701	900817	3,0	2,0	30	55				
PU0702	901209	10,4	1,9	30	55	6,10	8,40	10,0	
*PU10	910823	1,3	2,3	30	55				
*PU11	910823	1,0	3,1	30	55				
*PU12	910823	1,2	3,1	30	55				
*PU13	910824	3,0	4,2	30	55				
*PU14	910814	2,5	6,3	30	55				
*PU15	910824	2,3	4,9	30	55				
*PU16	910814	2,1	5,0	30	55				
*PU17	900825	2,1	4,3	30	55				
*PU18	900825	1,0	2,1	30	55				
*PU19	900825	1,0	2,0	30	55				
*PU20	910822	1,0	1,4	30	55				
*PU21	910822	2,4	1,3	30	55				
*PU22	910822	1,3	3,7	30	55				
*PU23	910822	3,7	5,7	30	55				
*PU24	910822	3,2	2,7	30	55				

*PU25	910824	2,3	4,9	30	55				
*PU26	910814	2,7	3,7	30	55				
*PU27	900823	2,3	4,0	30	55				
*PU28	900825	2,0	3,0	30	55				
*PU29	900823	1,4	3,0	30	55				

experimentos realizados en verano con intensidades de lluvia de 55 mm h^{-1} ninguno de ellos produjo escorrentía. Además, en todos estos casos, ni tan siquiera se produjo encharcamiento o escorrentía superficial, lo que explica la aptitud de estos suelos para la absorción de agua.

Durante el verano, sólo los experimentos con mayores intensidades han conseguido provocar encharcamiento y escorrentías (ver experimentos PU0301, PU0401 y PU0501 en las tablas 7 y 8). En estos casos, lluvias de intensidades de 180 mm h^{-1} , dan lugar a un encharcamiento importante en el minuto 2.3 (valores medios), que rápidamente se transforma en escorrentía superficial y en su medición (minuto 4.15).

Con la excepción de los experimentos realizados con elevadas intensidades de lluvia (180 mm h^{-1}), o los realizados en periodos húmedos, el encharcamiento y la escorrentía han sido insignificantes.

En algunos casos, incluso aumentando la intensidad de la lluvia la escorrentía no se ha producido o ésta ha sido insignificante.

En las figuras 3 y 4 se muestran los hidrogramas de todos los experimentos realizados en los que se ha obtenido escorrentía. También aparecen los experimentos en los que se utilizó más de una intensidad con objeto de comprender cómo la intensidad de la lluvia controla el proceso de infiltración.

Con intensidades de lluvia de 55 mm h^{-1} la tasa de escorrentía media (Esm) es 0 en verano y $11,07 \text{ mm h}^{-1}$ durante el periodo húmedo estudiado. También en verano, pero con una elevada intensidad de lluvia (180 mm h^{-1}), la escorrentía producida fue de $9,71 \text{ mm h}^{-1}$.

Los coeficientes de escorrentía en todos los casos son insignificantes: 0,186 para el periodo húmedo, 0 para el seco con la mismas características de la lluvia (55 mm h^{-1}) y 0,053 para los de intensidad mayor (180 mm h^{-1}) también en verano.

Los coeficientes de escorrentía del 25 % final de la curva de escorrentía (Ce25), y de los minutos 45 al 60 (Ce45-60) muestran que los caudales producidos por estos suelos, incluso cuando el suelo está muy húmedo, son poco importantes, lo que ratifica la alta conductividad hidráulica. Un ejemplo de este comportamiento es que en los experimentos sobre suelos muy húmedos, sólo el 21 % de la precipitación se convierte en escorrentía durante el cuarto final de la curva de escorrentía, cuando el suelo está prácticamente saturado. En el caso de los suelos secos la escorrentía es cero también en este período y sólo el 7,6 % de la lluvia es transformada en escorrentía en los experimentos con lluvias de elevada intensidad. Semejante es el resultado para el parámetro Ce45-60 (ver tabla 8).

En todos los casos nos encontramos con elevados valores de la tasa de infiltración final estable, del 100 % en verano y de más del 90 % durante los periodos invernales, siempre en términos medios para experimentos estándar (55 mm h^{-1}). Para los experimentos de mayor intensidad, la tasa de infiltración final estable ha sido de $168,8 \text{ mm h}^{-1}$, el 93,8 % de la lluvia precipitada, lo que deja claro la alta infiltrabilidad de estos suelos.

En los hidrogramas de las figura 3 y 4 se puede comprobar como para las distintas intensidades de lluvia utilizadas los caudales de la arroyada son siempre insignificantes. También se puede observar cómo los aumentos continuos durante los experimentos de la intensidad de la lluvia dan lugar a un continuo aumento de la escorrentía, pero los valores de la tasa de infiltración final estable aumentan y los coeficientes de escorrentía decrecen.

Algunas curvas de escorrentía presentan morfologías típicas de suelos hidrofóbicos. Un ejemplo de ello es el experimento PU0403B, en el cual, para ambas intensidades de lluvia, la escorrentía encontrada al inicio del experimento es mayor que cuando la tasa de infiltración se estabiliza (ver figura 4). Esto puede

Tabla 8. Principales parámetros de los 41 experimentos con lluvia simulada realizados sobre las 27 parcelas de la Serra de la Calderona. Esm, Escorrentía media (mm h^{-1}) y Ce, Coeficiente de escorrentía obtenidos directamente de los datos de campo. Ce25, Coeficiente de escorrentía en el 25 % final de la curva de escorrentía, Exponente de la ecuación de Horton (forma de la curva de escorrentía) (min^{-1}), fc, Tasa de infiltración final estable (mm h^{-1}), Vi60, Volumen infiltrado en el minuto 60 (mm) y Ce45-60, Coeficiente de escorrentía entre el minuto 45 y 60, obtenidos mediante el ajuste de la ecuación de Horton a los datos de campo.

Main parameters of the 41 experiments with simulated rainfall on the 27 plots at Serra de la Calderona. Esm, Average runoff (mm h^{-1}) y Ce, Runoff coefficient obtained directly from the field. Ce25, Runoff coefficient at the final 25 % of the runoff curve, Horton equation exponent (runoff curve form) (min^{-1}), fc, Steady state infiltration rate (mm h^{-1}), Vi60, Infiltrated volume at the minute 60 (mm) and Ce45-60, Runoff coefficient from the minute 45 to the minute 60, obtained by means of fitting the Horton equation to the field data

Prueba	Esm mm h^{-1}	Ce	Ce25	alfa min^{-1}	fc mm h^{-1}	Vi60 mm	Ce45-60
PU0101	5,37	0,10	0,11	0,38	48,65	49,61	0,10
PU0102	0	0	0		55	55	0
PU0103	0	0	0		55	55	0
PU0104	14,45	0,26	0,28	10,75	39,99	49,61	0,10
PU0201	0	0	0		55	55	0
PU0202	0	0	0		55	55	0
PU0203	0	0	0		55	55	0
PU0204	10,48	0,09	0,09		55		
PU0301	3,76	0,02	0,03	0,05	174,14	176,11	0,02
PU0302	0	0	0		55	55	0
PU0303	9,12	0,17	0,19	2,89	44,63	45,17	0,18
PU0401	6,24	0,03	0,04	1,88	173,10	173,69	0,04
PU0402	0	0	0		55	55	0
PU0403	14,69	0,27	0,24				
PU0501	19,13	0,11	0,16	0,88	159,18	160,16	0,11
PU0502	0	0	0		55	55	0
PU0503	17,24	0,31	0,41	0,18	31,79	34,58	0,37
PU0601	0	0	0		55	55	0
PU0602	6,60	0,12	0,14	0,59	46,83	47,55	0,14
PU0701	0	0	0		55	55	0
PU0702	4,33	0,08	0,13	0,35	47,44	48,99	0,11
PU10	0	0	0		55	55	0
PU11	0	0	0		55	55	0
PU12	0	0	0		55	55	0
PU13	0	0	0		55	55	0
PU14	0	0	0		55	55	0
PU15	0	0	0		55	55	0
PU16	0	0	0		55	55	0
PU17	0	0	0		55	55	0
PU18	0	0	0		55	55	0
PU19	0	0	0		55	55	0
PU20	0	0	0		55	55	0
PU21	0	0	0		55	55	0

PU22	0	0	0		55	55	0
PU23	0	0	0		55	55	0
PU24	0	0	0		55	55	0
PU25	0	0	0		55	55	0
PU26	0	0	0		55	55	0
PU27	0	0	0		55	55	0
PU28	0	0	0		55	55	0
PU29	0	0	0		55	55	0

ser debido a las características hidrofóbicas intrínsecas de la materia orgánica, especialmente con bajos contenidos de humedad, así como a la repelencia propia de las arenas.

5. Implicaciones hidromorfológicas

Diversos trabajos han puesto de manifiesto la elevada estabilidad de las ladera modeladas sobre areniscas a pesar de su elevada pendiente (Calvo, 1987). Los resultados aquí presentados confirman que la escorrentía superficial en estos suelos es insignificante, debido a que las tasas de infiltración son muy elevadas.

Un estudio a menor escala, es decir, aumentando el tamaño de las parcelas supondría una disminución de los caudales en valores relativos, como han demostrado distintos autores a escala de ladera (Yair & Lavee, 1985), a escala de parcela en laboratorio (Poesen & Bryan, 1989-1990), o a escala de cuenca (Gregory & Walling, 1973). También este concepto de reducción de la exportación de agua por unidad con el aumento del área estudiada afecta a la producción de sedimentos (Walling, 1983). Esto confirmaría para determinadas intensidades de precipitación la inexistencia de escorrentía superficial en la laderas, o bien sólo afectaría a algunas superficies muy concretas (rocosidad, zonas degradadas, etc.), para luego ser reinfiltrada ladera abajo con gran facilidad. Los valores de infiltración potencial obtenidos en las simulaciones de lluvia de estos suelos están muy por encima de la precipitación máxima medida en cualquier estación meteorológica de la zona (Elías & Ruiz, 1979). Por lo tanto, estas laderas carecen de escorrentía superficial directa.

Este comportamiento de los ecosistemas ante la lluvia implica que un porcentaje muy elevado de lluvia es infiltrado y evaporado sin llegar a formar parte del caudal líquido superficial, y que por el contrario, una parte insignificante, normalmente fruto de intensidades muy altas o eventos de precipitación de gran volumen, puede dar lugar a escorrentías superficiales. Otros mecanismos pueden generar flujos subsuperficiales a través de la matriz, especialmente cuando el suelo está saturado (Dunne & Black, 1970; Anderson & Kneale, 1980). También existe la posibilidad, cada vez más y mejor conocida, por la cual la escorrentía se produciría a través de flujos preferentes o macroporos (Bernier, 1985; Luxmoore et al., 1990).

En el caso del flujo subsuperficial mediante macroporos, el agua infiltrada llegaría a la superficie de una forma muy rápida, al contrario de lo que sucede con los flujos producidos mediante la saturación de las partes bajas de las laderas (Jones, 1981; Beven & Germann, 1982). Aunque en este trabajo no se ha podido discernir cual es el mecanismo de producción de escorrentía, al menos sí sabemos que el modelo de producción de escorrentía Hortoniano no es factible, incluso con elevadas intensidades de lluvia. Por el contrario, sí es posible intuir que en periodos húmedos la escorrentía en el cauce se puede producir por saturación paulatina de la base de las ladera, mientras que en las tormentas veraniegas y otoñales de gran intensidad, el flujo preferente a través de los macroporos puede ser el mecanismo más válido para la explicación de las crecidas muy rápidas como la ocurridas básicamente en otoño en la costa mediterránea de la Península Ibérica (Camarasa, 1991), o en otras estaciones en climas húmedos (Cammeraat & Imeson, 1988). La anteriores hipótesis deberán ser investigadas en futuros trabajos.

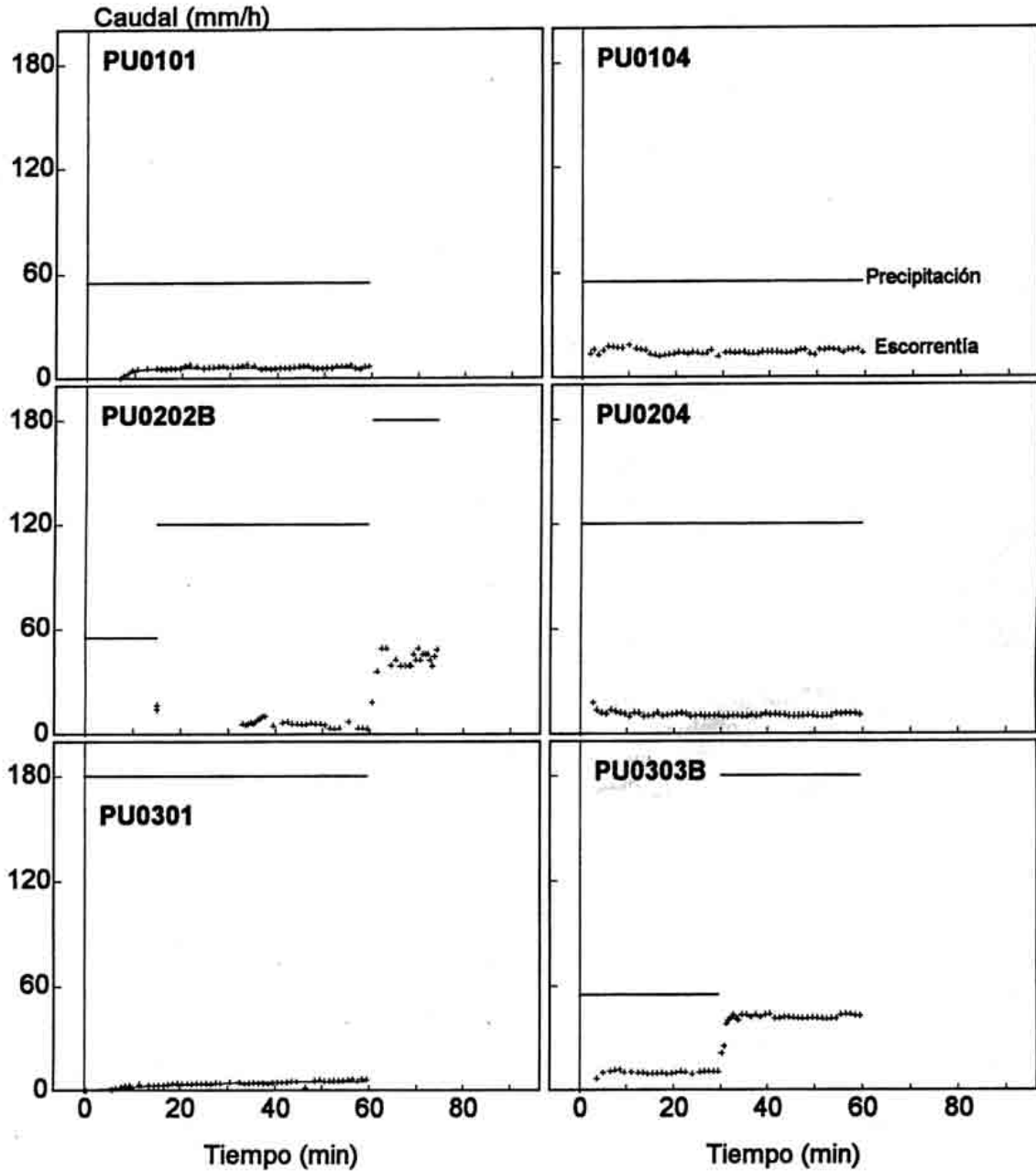


Figura 3. Curvas de infiltración obtenidas con lluvia simulada. Estaciones húmedas (primavera, invierno y otoño). Infiltration curves measured by simulated rain. Wet seasons (spring, winter and Autumn)

Desde el punto de vista geomorfológico, el que la escorrentía no se produzca superficialmente hace que sea muy difícil explicar elevadas tasas de erosión, las cuales seguramente son fruto en gran parte de la existencia de zonas degradadas, badlands, en áreas muy concretas de la cuenca de drenaje, como se ha demostrado en otros casos (Bryan et al., 1984). Los resultados aquí presentados indicarían que la erosión sólo se puede producir por disolución de los materiales, o bien por la remoción de los sedimentos existentes en el cauce.

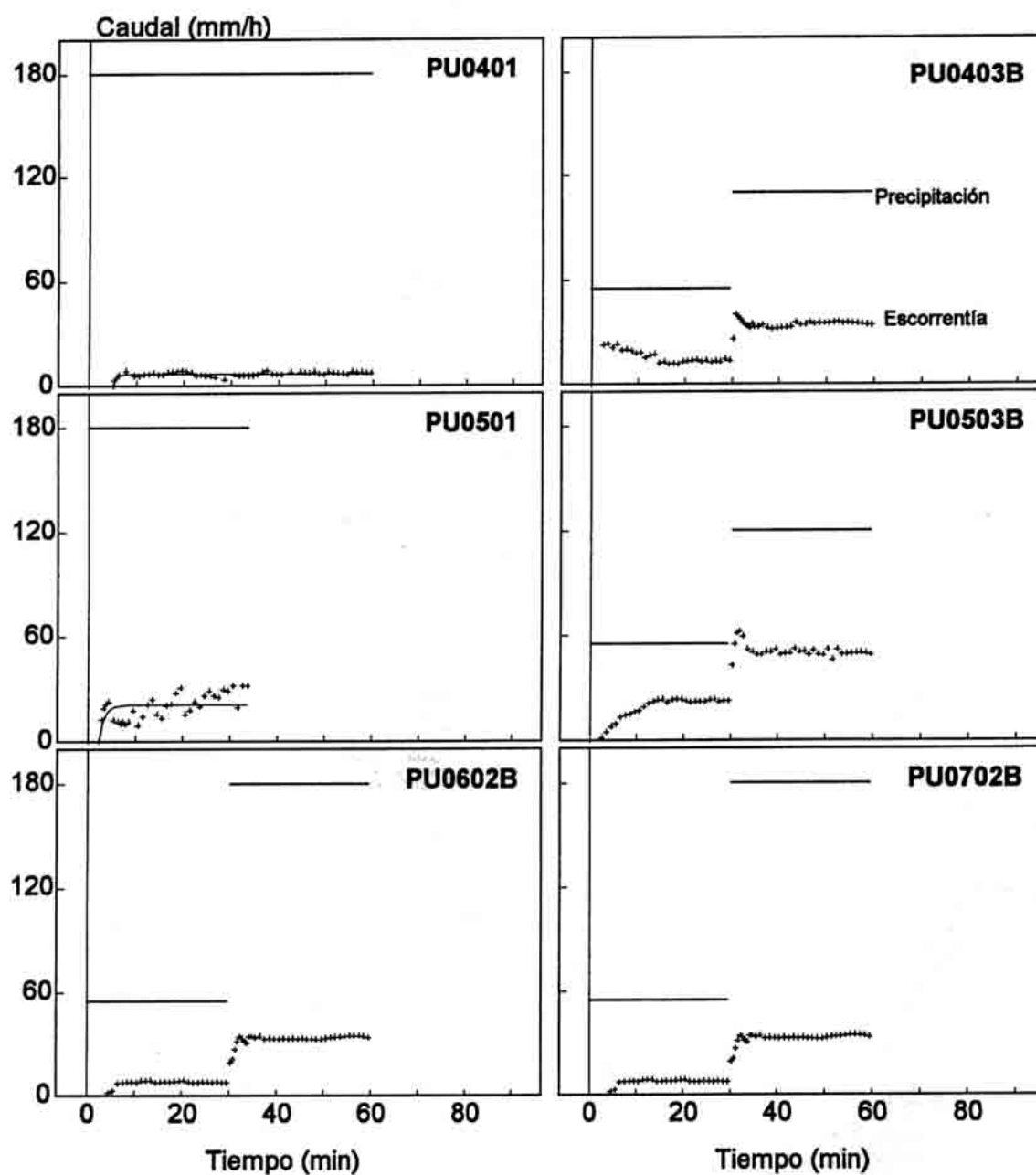


Figura 4. Curvas de infiltración obtenidas con lluvia simulada. Estación seca (verano). Infiltration curves measured by simulated rain. Dry season (summer)

Parte de la pérdida de suelo puede ser fruto de la elevada erosionabilidad de la escorrentía subsuperficial cuando se produce por medio de los macroporos o tubificaciones (Cammeraat, 1992), ya que la velocidad que alcanza la escorrentía en estas condiciones puede ser mayor que la de la arroyada superficial (Bonell et al., 1984). La elevada pendiente de las laderas modeladas sobre areniscas hace que esta segunda opción sea muy factible (Luxmoore et al., 1991).

En general, podemos decir que la morfología de las laderas puede estar determinada más por los flujos subsuperficiales que por la arroyada superficial, bien sea a través de macroporos, bien a través de la matriz. Al respecto, algunos investigadores han diseñado modelos de erosión por flujos subsuperficiales (Dunne, 1990), ya que en gran medida éstos son los que controlan la morfología terrestre en el ámbito de las laderas.

6. Conclusiones

Los resultados de las veinte mediciones realizadas mediante encharcamiento artificial y los 48 experimentos con lluvia simulada (41 con una y 7 con diferentes intensidades de lluvia) nos permiten afirmar que la escorrentía superficial es poco importante en los suelos sobre areniscas. En verano, o en cualquier periodo de elevada sequedad, la arroyada superficial es inexistente, y en los periodos húmedos es insignificante.

Esto es debido a la elevada capacidad de infiltración de los suelos, la cual cuando se produce mediante encharcamiento (infiltrómetro de cilindro) alcanza valores elevadísimos: entre 10.707 y 6.097 mm h⁻¹ para fo, y 1.154 y 705 mm h⁻¹ para fc. Incluso con elevadas intensidades de lluvia (180 mm h⁻¹) se producen escorrentías insignificantes, y la tasa de infiltración aumenta debido a la mayor precipitación.

Estos resultados tienen unas claras implicaciones hidrogeomorfológicas, ya que la escorrentía Hortoniana (superficial directa) no se producirá nunca, y por lo tanto los caudales se generarán subsuperficialmente, vía macroporos o matriz, y las pérdidas de suelo serían fruto de la disolución o bien de la erosión interna de los macroporos o tubificaciones.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Enrique Terol, Rosina Navarro e Isabel Sala su ayuda en la realización de las simulaciones de lluvia y en la toma de muestras, así como a Drs. Adolfo Calvo Cases y Rafael García Bartual el tratamiento de la información y la discusión de los resultados. Se agradece la beca de la *Conselleria de Cultura i Ciència de la Generalitat Valenciana* para la realización de la Tesis Doctoral del autor, de la cual es parte este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Anderson, M.G. & Kneale, P.E. (1980): Topography and hillslope soil water relationship in a catchment of low relief. *Journal of Hydrology*, 47, 115-128.
- Bernard, M., Calvo, A., Diago, D., Estens, F. & Recatalà, T. M. (1988): Algunos aspectos del comportamiento hidrológico de los suelos forestales de la Sierra de Espadán. *Iº Congrés d'Història i Filologia de la Plana*, Nules, 47-58.
- Bernier, P.Y. (1985): Variable source area and storm-flow generation: an update of concept and a simulation effort. *Journal of hydrology*, 79, 195-213.
- Betson, R. P. (1964): What is watershed runoff?. *J. Geophys. Res.*, 69 (8) 1541-1551.
- Beven, K. & Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18 (5) 1311-1325.
- Bonell, M., Hendriks, M.R., Imeson, A.C. & Hazelhoff, L. (1984): The generation of storm runoff in a forested clayey drainage basin in luxembourg. *Journal of Hydrology*, 71, 53-77.
- Bryan, R.B., Imeson, A.C. & Campbell, I.A. (1984): Solute release and sediment entrainment on microcatchments in the Dinosaur Park Badlands Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 71, 79-106.
- Burt, T.P. (1985): Slope and Slope Processes. *Progress in Physical Geography*, 9, 582-599.
- Burt, T.P. (1987): Slope and Slope Processes. *Progress in Physical Geography*, 11, 590-611.
- Calvo, A. (1987): *Geomorfología de laderas en la montaña del País Valenciano*. I.V.E.I., Col. Politécnica, Valencia, 301 p.

- Calvo, A.** (1992): *Relaciones agua-suelo-vegetación en la Serra d'Espadà*. Trabajo Inédito. IVEI, València, 230 p.
- Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E. & Romero, M.** (1988): Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En M. Sala y F. Gallart (Eds.): *Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*, S. E. G. Monografía 1, pp. 6-15
- Calvo, A., Harvey, A.M. & Payà, J.** (1991): Process interactions and badland development in SE. Spain. En Sala, M., Rubio, J.L. y García, J.M. (Eds.): *Soil Erosion Studies in Spain*, 75-96.
- Camarasa, A.M.** (1991): *Génesis de crecidas en pequeñas cuencas semiáridas: Barranc de Carraixet y Rambla de Poyo*. Tesis Doctoral inédita, Universitat de València, II tomos.
- Cammeraat, L.H.** (1992): *Hydro-geomorphologic processes in a small forested sub-catchment: preferred flow-paths of water*. Tesis Doctoral, Univesiteit van Amsterdam, 146 p.
- Cammeraat, L.H. & Imeson, A.C.** (1988): The measurement of hydrogeomorphological discontinuities on a uniform forested slope. *Soil Technology*, 1, 365-371.
- Cerdà, A.** (1993a): *La Infiltración en los Suelos del País Valenciano. Factores y Variaciones Espacio-Temporales*. Tesis Doctoral Inédita, Universitat de València, 357 p + apéndices.
- Cerdà, A.** (1993b): Metodología para el estudio de la hidrología y erosión de superficies degradadas (badland) a partir de lluvia simulada. *Cuaternario y Geomorfología*, 7.
- Dunne, T.** (1990): Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. En Higgins, C.G. y Coates; D.R. (Eds.): *Grounwater geomorphology: the role of subsurface water in earth surface processes and landforms*, 1-28.
- Dunne, T. & Black, R.D.** (1970): Partial area contribution to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6, 1269-1311.
- Elías, J. & Ruiz, L.** (1977): *Precipitaciones máximas en España*. Ministerio de Agricultura, Madrid, 545 p.
- Evenari, M., Shanan, H. & Tadmor, N.H.** (1971): *The Negev, the challenge of a desert*. Harvard University Press.
- Gregory, K.J. & Walling, D.E.** (1973): *Drainage Basins Forms and Processes: A Geomorphological Approach*. Arnold, London 458 p.
- Harvey, A.M., & Calvo, A.** (1991): Process interactions and rill development on badlands and gully slopes. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 83, 175-94.
- Hewlett, J.D.** (1961): Some ideas about storm runoff and base flow. United States Department Agriculture, Forest Service. Southeast Forest and Range Experiment Station, *Annual Report*, 62-66.
- Hewlett, J.H. & Hibbert, A.R.** (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En Sopper, W.E. y Lull, H.W. (Eds): *Proceedings of Inter. Symp. of Forest Hydrology*, 275-290.
- Horton, R.E.** (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS Trans A.G.U.*, 14, 446-460.
- Horton, R.E.** (1940): An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 5, 399-417.
- Hudson, N.** (1982): *Conservación de suelo*. Reverté, s. a. Barcelona, 335 p.
- Imeson, A.C. & Verstraten, J.M.** (1988): Rills on badland slopes: a physico-chemical controlled phenomenon. *Catena supplement* 12, 139-50.
- Jones, J.A.A.** (1981): *The Nature of Soil Piping - A review of research*. BGRG Research Monograph 3, 301 p.
- Luxmoore, R.J., Jardine, P.M., Wilson, G.V., Jones, J.R. & Zelazny, L.W.** (1991): Physical and Chemical Controls of Preferred Path Flow Through a Forested Hillslope. *Geoderma*, 46, 139-154.
- Poesen, J. & Bryan, R.B.** (1989-90): Influence de la longueur de pente sur le ruissellement: role de la formation de rigoles et de croutes de sedimentation. *Cah. ORSTOM, ser. Pedol.*, XXV, 1-2, 71-80.
- Scoging, H.** (1982): Spatial variations in infiltration runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. In Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 89-112.

- Scoging, H.M. & Thornes, J.B.** (1980): Infiltration characteristics in a semiarid environment. *IAHS Publication*, 128, 159-168.
- Shick, A.P.** (1970): Desert floods. Interim results of observations in the Nahal Yael research watershed, Southern Israel, 1965-1970. *IAHS Publication* 96, 479-493.
- Shick, A.P.** (1977): A tentative sediment budget for an extremely arid watershed in Southern Negev. En Doehring, D.O. (Ed.): *Arid Geomorphology*, 139-163.
- Thornes, J.B.** (1980): Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint. En Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. (Eds.): *Soil Erosion*, 129-182.
- Walling, D.E.** (1983): The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65, 209-237.
- Ward, R. C.** (1975): *Principles of hydrology*. McGraw-Hill Book Company, Maidenhead, 367 p.
- Whischmeier, W.H. & Smith, D.D.** (1978): *Predicting Rainfall Erosion losses*. USDA Agricultural Handbook, 537 p.
- Yair, A.** (1983): Hillslope hydrology water harvesting and areal distribution of some ancient agricultural systems in the northern Negev desert. *Journal of Arid Environments*, 6, 283-301.
- Yair, A. & Danin, A.** (1980): Spatial variation in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Oecologia*, 47, 83-88.
- Yair, A. & Lavee, H.** (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones. En Anderson y Burt, T.P. (Eds.): *Hydrological Forecasting*, 183-220.