



Análisis de la variabilidad temporal de la infiltración en un gradiente de degradación de usos del suelo en el Pirineo central

Analysis of infiltration temporal variability in a gradient of soil uses degradation in the Central Pyrenees

Regüés, D.⁽¹⁾; Serrano-Muela, P.⁽¹⁾; Nadal-Romero, E.⁽²⁾; Lana-Renault, N.⁽³⁾

(1) Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei, Apartado 13034, 50059, Zaragoza, España.

(2) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

(3) Área de Geografía, Departamento de Ciencias Humanas, Universidad de La Rioja, 26004, Logroño, España.

Resumen

Se analiza la capacidad de infiltración con respecto a las condiciones físicas superficiales (humedad y resistencia mecánica) de suelos en el Pirineo Central, considerando tres escenarios: bosque natural, campos abandonados y cárcavas. El estudio se ha realizado en tres cuencas experimentales (San Salvador, Arnás y Araguás) situadas en un contexto geográfico, geológico y climático similar. La información se ha obtenido mediante ensayos con un infiltrómetro de doble anillo entre otoño de 2008 y verano de 2009. Los resultados sugieren cierto efecto de las condiciones físicas previas sobre la capacidad de infiltración. Sin embargo, el uso del suelo y la orientación de las laderas (N-S) se han revelado los factores más determinantes. Esto se relaciona con la variabilidad estacional del estado físico antecedente y su dinámica durante los ensayos. Las diferencias de la infiltración asociada a la orientación de las laderas incluso pueden superar a las observadas entre usos del suelo.

Palabras clave: Infiltración, usos del suelo, cubierta vegetal, condiciones físicas.

Abstract

The infiltration capacity has been analysed related to the variation of surface physical conditions (moisture and mechanical resistance) of soils from the Central Spanish Pyrenees, taking into account the most rep-



representative situations of land uses and vegetal covers. The study was carried out in three experimental catchments, each representative of different environments in terms of soil use and vegetation cover: forested (San Salvador), field abandonment (Arnás) and badlands (Araguás). The three catchments are located nearby and have similar geological and climatic conditions. The study was done through experimental infiltration sets using a big double ring instrument (50 cm water column height). Experiments were performed from autumn 2008 to summer 2009. The infiltration process was analysed on six land uses situations: bare regolith, grass covered regolith, north-facing slope in forested soil, south-facing slope in forested soil, north-facing slope in meadow soil and south-facing slope in pasture soil. Before and after each experiment soil was sampled in order to estimate moisture content (0-1, 0-5 and 5-10 cm depth) and surface mechanical resistance was measured with the help of a pocket penetrometer, providing an idea about previous conditions and its variation. The results suggest a certain effect of moisture conditions on infiltration capacity. However, soil use and slope exposition (North and South) seem to be the most determinant factors. This is related to the seasonal variability of antecedent soil conditions and its dynamics during the experiments. The differences on infiltration capacity associated with slope exposition can be higher than those observed between land uses.

Key words: Infiltration, land use, plant covers, physical conditions.

1. Introducción

Desde mediados del siglo XX el Pirineo Central se ha visto afectado por continuos cambios en el paisaje, asociados principalmente a la recuperación de la vegetación tras el abandono de cultivos y la deforestación (Molinillo *et al.*, 1997; Vicente-Serrano, 2006). El estudio de Lasanta (1988) destaca que alrededor del 75% de los campos que estuvieron cultivados hasta mediados del siglo XX han sido abandonados durante los últimos 70 años. Asimismo, se ha observado una importante reducción de la presión ganadera y todo tipo de modificaciones asociadas a las actividades humanas (García-Ruiz y Balcells, 1978; García-Ruiz y Lasanta, 1990). Actualmente, amplias áreas que estuvieron ocupadas por campos de cultivo y pastizales se han repoblado de forma natural por matorrales y bosques de sucesión (Poyatos *et al.*, 2003; Vicente-Serrano *et al.*, 2004).

Un gran número de estudios demuestra que la cubierta vegetal ejerce una gran influencia sobre la respuesta hidrológica (Bosch y Hewlett, 1982; Trimble *et al.*, 1987; Sahin y Hall, 1996; Stednick, 1996; Gallart y Llorens, 2003;

Andréassian, 2004; Brown *et al.*, 2005). En este sentido, investigaciones recientes realizadas en el Pirineo Central revelan cambios significativos en la respuesta hidrológica asociados al crecimiento de la vegetación y de la masa arbórea, que se han manifestado en una menor frecuencia e intensidad de las crecidas (Beguiría *et al.*, 2003; López-Moreno *et al.*, 2006); asimismo, García-Ruiz *et al.* (2008) constatan que la reducción de superficie forestal, en favor de pastos, aumenta el número y la magnitud de las crecidas, causando un importante incremento del volumen de escorrentía.

Así, estudios realizados en cuencas experimentales del Pirineo Central y Oriental muestran importantes diferencias en la producción de sedimento en ambientes con diferentes tipos de cubierta vegetal o afectados por cambios de usos del suelo (Gallart *et al.*, 2005; García-Ruiz *et al.*, 2008). Esto implica que las diferencias en la respuesta hidrológica asociadas a los cambios de usos del suelo suelen intensificar los procesos de erosión (García-Ruiz, 2010) y activar cambios de carácter geomorfológico (García-Ruiz *et al.*, 2010), tales como el desarrollo de cárcavas (Nadal-Romero *et al.*, 2006; Gallart, 2009).

En este sentido, el interés por estudiar las relaciones entre usos del suelo, propiedades hidráulicas y mecanismos de generación de flujos ha aumentado durante los últimos años (Germer *et al.*, 2010; Price *et al.*, 2010). Los trabajos de Zimmermann *et al.* (2006) o Zimmermann y Elsenbeer (2008) describen importantes variaciones de la conductividad hidráulica saturada y de la capacidad de infiltración asociados a cambios de uso del suelo. Asimismo, se ha analizado la influencia del estado físico antecedente del suelo (humedad, densidad aparente, compactación y porosidad) sobre la variabilidad espacial (Sisson y Wierenga, 1981; Hopmans *et al.*, 1988; Mallants *et al.*, 1996; Strock *et al.*, 2001) y temporal (Moret y Arrúe, 2007; Bormann y Klaassen, 2008; Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009) de sus propiedades hídricas. No obstante, Hu *et al.* (2009) consideran que la variabilidad temporal de las propiedades hídricas del suelo no está suficientemente estudiada, en comparación con la componente espacial. En este sentido, el desarrollo de modelos sobre la capacidad de infiltración todavía presenta limitaciones, que se asocian principalmente con las incertidumbres sobre la variabilidad temporal del proceso (Mishra *et al.*, 2003).

2. Objetivos y metodología

Este estudio se ha centrado en analizar la variabilidad temporal de la capacidad de infiltración en tres ambientes representativos del Pirineo Central, caracterizados por presentar fuertes contrastes en los usos del suelo y la cubierta vegetal (cárcavas, campos abandonados y bosque) que configuran un gradiente de la degradación que afecta a los suelos y al paisaje. Se han considerado como variables determinantes el estado físico del suelo (humedad y resistencia mecánica superficial) y la exposición de las vertientes (norte y sur). Además, es importante destacar que el estudio se ha realizado en un contexto geográfico (altitud), geológico (litología del substrato) y climático muy similar y, por consiguiente, comparable.



Figura 1. Infiltrómetro de doble anillo.
Figure 1. Double ring infiltrometer.

La metodología se ha basado en la utilización de un infiltrómetro de doble anillo (Fig. 1) con el cilindro menor o interior de 60 cm de alto x 29,5 cm y el mayor o exterior de 60 cm de alto x 49,5 cm de ancho. Los ensayos se han realizado en seis escenarios: suelo forestal sin alterar (norte y sur), prado o pasto en campos abandonados (norte y sur) y superficie acaravada (sin vegetación y parcialmente cubierta por herbáceas). La distribución temporal de los experimentos se ha asociado a la distribución climática estacional, considerando el contraste térmico e hídrico que se produce a lo largo del año, con la finalidad de analizar la variabilidad temporal de la capacidad de infiltración en relación con los cambios del estado físico. La duración de los ensayos se ha ajustado al tiempo de estabilización de la tasa de infiltración en el cilindro menor/interior, el descenso del nivel de agua se ha controlado mediante una escala con es-

paciado milimétrico adosada a la superficie interior del cilindro y el tiempo transcurrido se ha obtenido con un cronómetro. El nivel de agua al inicio de cada ensayo ha sido constante (50 cm), mientras la altura final de la columna de agua fue variable, dependiendo de la duración y velocidad de infiltración en cada caso. Por otro lado, al inicio y finalización de cada ensayo se ha evaluado la humedad en superficie (Hsup) y en profundidad (H0-5 y H5-10) a partir de muestras tomadas con un tubo metálico y la resistencia mecánica superficial (RMS) mediante un penetrómetro (Geotester de G. Weber), que han permitido contrastar el estado físico previo y posterior.

3. Área de estudio

Este estudio se ha realizado en tres ambientes característicos de la montaña media (800-

1400 m s.n.m.) en el Pirineo Central. Más concretamente, en tres cuencas hidrográficas situadas en la margen norte de la Depresión Interior Altoaragonesa, que forman parte de la red de drenaje de los ríos Estarrún y Lubierre, los cuales son afluentes del río Aragón (Fig. 2).

Con respecto a las características geológicas, el núcleo de la Depresión Interior Altoaragonesa está constituido por un substrato de rocas sedimentarias blandas definidas como Margas de Larrés, que son de edad Eoceno (Remacha *et al.*, 1987). Mientras el margen norte está constituido por materiales más duros, correspondientes a las turbiditas pirenaicas de la facies Flysch de edad Eoceno (Soler y Puigdefábregas, 1970), que conforman los relieves más acentuados.



Figura 2. Área de estudio y localización de las cuencas experimentales.
Figure 2. Study area and experimental catchment location.

Estas cuencas están monitorizadas mediante una estación de aforo y registros meteorológicos (temperatura, humedad y radiación), además cuentan con pluviómetros e instrumentos específicos para el registro de otras variables de interés hidrológico. Esto ha permitido analizar la respuesta hidrológica y sedimentológica en distintas situaciones de uso del suelo y cubierta vegetal, pero en un marco geográfico, geológico y climático muy similar. A continuación, se describe brevemente las principales características de usos del suelo y tipo de cubierta vegetal de estas tres zonas de estudio:

-Cuenca de San Salvador (0,92 km²): muestra un ambiente forestal muy poco alterado. Está constituido por un bosque denso y mixto de pino (*Pinus sylvestris*) y haya (*Fagus sylvatica*) en la ladera norte, con un sotobosque de matorral muy denso y cerrado. Mientras, la ladera sur presenta un bosque más abierto de quejigo (*Quercus faginea* gr.) y pino, con algún claro dominado por la presencia de matorral, sobre todo en laderas con signos de haber estado afectadas por actividades agrícolas y ganaderas. Los suelos muestran un estado de conservación y mejor desarrollo en ladera umbría que en solana.

-Cuenca de Arnás (2,84 km²): es representativa de un ambiente afectado por el abandono de cultivos. La ladera solana constituye un mosaico dominado por pastos sobre campos en pendiente abandonados y en fase de recolonización espontánea de matorral, además presenta zonas con predominio de especies arbustivas y con presencia muy dispersa de pino (*Pinus sylvestris*). La ladera umbría muestra una cubierta vegetal bastante más densa, formado por parches intermitentes, de entre 1 hasta 50 ha de superficie, formados por bosque de pinar y/o una densa cubierta de matorral, alternando con áreas dominadas por prados con matorral disperso sobre campos en pendiente abandonados. Los suelos en ladera umbría están más desarrollados y son más profundos que en solana.

-Cuenca de Araguás (0,45 km²): representa un ambiente intensamente modificado y afec-

tado por la actividad antrópica. Se distinguen tres zonas con características claramente diferenciadas, la parte superior de la cuenca (950-1105 m) cuenta con laderas completamente regularizadas por terrazas artificiales y cubiertas por un bosque de pino (*Pinus sylvestris*) de reforestación (llevada a cabo entre 1960 y 1970), la parte media (850-950 m) muestra prados con cubrimiento espontáneo de matorral sobre terrazas abandonadas, y la parte inferior (780-850 m) está fuertemente afectada por el desarrollo de cárcavas.

El clima de la zona se ha definido como submediterráneo de montaña o de transición (Creus, 1983) por mostrar una distribución estacional de temperatura y precipitaciones, propias del clima mediterráneo, pero está afectado por influencias de tipo atlántico y continental, que se asocian a la entrada de masas de aire muy húmedo y fresco. La precipitación media anual es de 900 ± 250 mm y se distribuye de manera bastante irregular. La mayor parte se acumula entre otoño y primavera, en verano destacan las tormentas dispersas muy intensas pero de corta duración, mientras en invierno las precipitaciones son bastante escasas y de intensidades bajas o moderadas, aunque las nevadas débiles son bastante frecuentes. Las temperaturas muestran un fuerte contraste entre los valores máximos en verano y los mínimos en invierno (30 a -14°C respectivamente), es importante destacar que entre octubre y abril se pueden registrar alrededor de 100 días con temperaturas medias rondando los 0°C, aunque su efecto cambia notablemente entre vertientes solana o umbría, con situaciones de heladas persistentes en las últimas y una acción mucho más esporádica en las primeras. En este sentido, es importante destacar que este fuerte contraste térmico entre las vertientes norte y sur afecta a la disponibilidad hídrica entre laderas.

La orientación de las vertientes es un factor determinante en la distribución de la vegetación y el desarrollo de los suelos. En las laderas con exposición sur los suelos son pobres y

poco desarrollados (leptosoles, cambisoles y regosoles), esto se pone de manifiesto en la cubierta dominada por la presencia de matorral y la menor densidad arbórea; mientras que en las laderas orientadas hacia el norte los suelos son más fértiles y profundos (kastanozems y phaeozems) y predomina el bosque bien desarrollado (Lana-Renault *et al.*, 2010; Serrano-Muela *et al.*, 2010). Por otra parte, destaca la presencia de cárcavas sobre el substrato margoso en la Depresión Interior, que muestran un mayor desarrollo y una dinámica geomorfológica más intensa en las laderas norte (Nadal-Romero *et al.*, 2008).

4. Resultados

4.1. Condiciones experimentales

La Tabla 1 presenta las situaciones en que se realizaron los ensayos de infiltración, lo cual

permite comparar las variaciones temporales que muestran las condiciones físicas entre los usos del suelo considerados. En este sentido, se observa que el regolito sin vegetación muestra unos porcentajes de humedad bastante bajos, tanto iniciales como finales, en comparación con los demás usos del suelo. En cambio, en el regolito con cubierta vegetal los valores son sensiblemente mayores, incluso más próximos a los registrados en los suelos de pasto sur y forestal sur. Con respecto a los contenidos hídricos iniciales en los suelos con cubierta vegetal, en general, son más altos en las laderas norte y presentan una menor variación en profundidad. En este sentido, el contraste más acentuado se ha observado entre el prado norte y el pasto sur, donde las diferencias entre H.sup son menores que entre H.5-10, mientras las diferencias menores se relacionan con los suelos forestales. Asimismo, con respecto a la humedad

Tabla 1. Distribución temporal de los ensayos de infiltración con indicación de las condiciones físicas iniciales y finales. Entre paréntesis se muestra un valor asignado a cada uso del suelo, que corresponde al estado de degradación en orden decreciente. (RMS: Resistencia Mecánica Superficial).

Table 1. Temporal distribution of infiltration experiences with initial and final physical conditions indication. Between brackets is showed a value for each land use corresponding with its degradation situation in decreasing order (RMS: Surface Mechanical Resistance).

Fecha	Uso del suelo	Humedad Inicial (%)			Humedad Final (%)			RMS (kg m ⁻²)	
		Sup.	0-5	5-10	Sup.	0-5	5-10	Inicial	Final
07/10/2008	Regolito (1)	1,1	3,2	5,9	30,2	19,4	13,1	5,5	0,7
13/02/2009	Regolito (1)	16,2	10,0	11,8	24,2	17,2	14,9	4,5	0,8
29/07/2009	Regolito (1)	0,8	2,6	5,6	34,7	16,1	9,6	13,3	0,4
07/10/2008	Regolito cubierto (2)	9,8	10,2	8,4	26,9	25,0	21,7	13,3	3,7
13/02/2009	Regolito cubierto (2)	31,2	18,3	23,6	30,6	26,3	36,9	3,0	2,7
29/07/2009	Regolito cubierto (2)	3,1	5,4	5,2	33,7	28,7	23,9	13,4	4,2
07/11/2008	Pasto sur (3)	27,7	26,9	16,3	39,5	31,8	28,0	5,2	5,2
12/06/2009	Pasto sur (3)	23,7	22,9	14,1	36,5	40,6	18,1	6,3	2,9
17/07/2009	Pasto sur (3)	10,1	10,5	6,2	36,8	26,5	21,9	12,7	6,6
07/11/2008	Prado norte (4)	36,3	32,7	26,1	57,7	58,3	58,4	4,6	3,4
12/06/2009	Prado norte (4)	34,0	33,6	27,2	47,4	42,5	35,8	2,9	2,1
17/07/2009	Prado norte (4)	14,1	17,7	15,7	41,1	38,4	32,3	12,1	4,0
27/10/2008	Bosque sur (5)	25,9	22,8	21,3	38,8	33,3	26,0	4,7	3,2
22/12/2008	Bosque sur (5)	33,7	29,7	22,7	37,6	33,5	22,4	4,2	2,3
12/06/2009	Bosque sur(5)	23,3	18,1	20,1	40,5	33,3	22,9	4,8	2,8
29/07/2009	Bosque sur (5)	8,4	10,9	10,1	34,7	30,0	20,6	7,5	4,2
27/10/2008	Bosque norte (6)	31,4	27,5	23,6	40,0	36,7	24,1	4,4	3,5
22/12/2008	Bosque norte (6)	51,2	36,0	22,4	57,6	42,0	23,8	6,7	5,4
12/06/2009	Bosque norte (6)	23,0	22,9	16,3	59,7	46,9	24,1	6,0	2,4
29/07/2009	Bosque norte (6)	7,6	11,7	14,1	46,1	35,7	36,2	4,5	3,4

inicial, se observa un mayor incremento en profundidad cuanto menor es el valor superficial. Por otro lado, se debe comentar que el valor de humedad superficial inicial que supera el 50% (bosque norte, 22/12/2008) está causado por la presencia de hielo. Con respecto a los valores finales de humedad, cabe destacar tres aspectos: un fuerte contraste entre el regolito desnudo y los demás usos del suelo, con valores sensiblemente inferiores incluso a los del regolito cubierto, el contenido hídrico mayor de los suelos en exposición umbría y un menor incremento de la humedad en profundidad en los suelos con exposición solana.

Por otro lado, con respecto a los valores de RMS, se observa que el suelo forestal presenta los valores más constantes, tanto los previos como los posteriores a los ensayos. Por el contrario, el regolito sin vegetación revela un importante contraste temporal entre ensayos, aunque estas diferencias son especialmente grandes entre los valores iniciales y finales de cada ensayo. Mientras, el regolito con cubierta vegetal y las situaciones prado/pasto muestran tendencias bastante parecidas, con diferencias entre ensayos (temporales) de magnitud parecida a las registradas en el regolito sin vegetación. En cualquier caso, tanto en el regolito cubierto como en los prados, las diferencias entre los valores iniciales y finales son algo menos

acentuadas a las observadas en el regolito descubierto. Por último, mencionar que la exposición de las laderas no parece afectar al valor de la RMS.

4.2. Tasas medias de infiltración

Los resultados expuestos en la Tabla 2 permiten analizar el efecto de los usos del suelo sobre las tasas medias de infiltración. Si se comparan los tres usos del suelo, sin tener en cuenta las diferencias de orientación o de cubierta vegetal, se observa que las tasas de infiltración media más bajas corresponden al regolito, mientras los valores en bosque y prado son sensiblemente mayores. Asimismo, las tasas de infiltración media en prado sur y bosque sur son menores que la del regolito cubierto. Por el contrario, las diferencias entre los valores obtenidos en bosque norte y sur, a pesar de ser importantes, muestran un contraste mucho menor al observado entre prado norte y sur. Sin embargo, al considerar los seis escenarios analizados, se observa que la tasa media más baja corresponde al regolito desnudo, mientras el valor más elevado es el del prado norte.

Por otro lado, los valores máximos y mínimos ponen de manifiesto las grandes diferencias que existen entre los ambientes con cubierta vegetal y el regolito desnudo. En este sentido,

Tabla 2. Valores promedios de infiltración registrados en los seis ambientes experimentales.

Table 2. Average values of infiltration recorded on the six experimental environments.

	<i>Inf. Media</i> ($l.h^{-1}$)	<i>Dsv. tip.</i> ($l.h^{-1}$)	<i>Inf. Máxima</i> ($l.h^{-1}$)	<i>Dsv. tip.</i> ($l.h^{-1}$)	<i>Inf. Mínima</i>	<i>Dsv. tip.</i> ($l.h^{-1}$)
Regolito	11,48	15,99	63,77	73,31	2,30	2,61
Regolito (desnudo)	7,07	5,83	40,74	42,86	1,74	1,51
Regolito (cubierto)	15,89	24,86	86,81	104,65	2,85	3,88
Prado	20,12	13,59	124,40	79,09	8,25	5,16
Pasto (sur)	10,00	9,79	79,29	88,47	4,78	3,72
Prado (norte)	30,24	7,63	169,51	41,28	11,71	4,09
Bosque	15,17	7,61	125,09	93,60	6,33	4,07
Bosque (sur)	10,68	6,35	129,19	136,00	3,90	3,57
Bosque (norte)	19,66	6,41	120,98	43,60	8,77	3,17

se observa que los valores de infiltración en regolito con cubierta vegetal son similares a los del pasto sur, mientras la infiltración más elevada corresponde al prado norte y las menores variaciones entre las laderas norte y sur se encuentran en el ambiente forestal. En cualquier caso, la observación de los valores de desviación típica (media, máxima y mínima) indica que la variabilidad temporal en las laderas con exposición sur es siempre mayor a la que se produce en las laderas con orientación norte. Así, las tasas de infiltración en pasto sur y en bosque sur presentan índices de variación mucho más próximos a los de los regolitos, donde los valores de desviación son mayores a los registros promedios, que a los del mismo uso de suelo en orientación norte, donde estas desviaciones son claramente inferiores a los valores promedio (máximo, medio y mínimo).

4.3. Usos del suelo, estado físico y capacidad de infiltración

La Figura 3 muestra las relaciones entre la tasa media de infiltración estimada en cada ensayo y las condiciones iniciales de estado físico (humedad y RMS), diferenciando los 6 ambientes experimentales. El análisis de correlación lineal de Pearson, realizado para evaluar objetivamente dichas relaciones, indica que solamente la humedad superficial en prado norte muestra una clara significación estadística (1%) con la infiltración. Sin embargo, las correlaciones lineales entre las cuatro variables del estado físico sugieren significación estadística débil (5%) entre los contenidos hídricos en bosque sur, cárcava desnuda y cubierta, además de tres casos de correlación significativa (1%): prado norte (H.0-5 con H.5-10), pasto sur (H.sup con H.0-5) y bosque sur (RMS con H.5-10). En cualquier caso, se debe tener en cuenta que el número de casos considerado es demasiado reducido (3 ó 4) para poder considerar seriamente los resultados de las correlaciones lineales en cada uso del suelo, esto se pone de manifiesto en el escasísimo margen que presentan los coeficientes de regresión R para al-

canzar un valor de sigma estadísticamente significativo (<5 %). Por este motivo, las conclusiones derivadas de este análisis se han valorado con cierta prudencia.

De todas formas, merece la pena comentar algunas de estas relaciones, incluso algunas que no presentan significación estadística, con el fin de discriminar las situaciones de uso del suelo en las que la capacidad de infiltración parece ser más sensible a los cambios del estado físico superficial.

En los ensayos realizados con regolito (desnudo y vegetado) los resultados son peores de lo que se había supuesto en principio. Las relaciones estadísticamente significativas se limitan a cuatro correlaciones débiles (5%), que se producen entre los valores de humedad (Hi.sup-Hi.0-5, Hi.sup-Hi.5-10 y Hi.0-5-Hi.5-10) en el regolito desnudo y una (Hi.sup-Hi.5-10) en el regolito con cubierta vegetal. Por otro lado, el coeficiente de correlación más alto observado entre los valores de infiltración media en cárcavas y las variables físicas se obtuvo con la RMS inicial en el regolito desnudo ($R = -0,990$; $\sigma = 0,088$), lo cual constituye un dato a tener en cuenta, a pesar de no alcanzar el umbral de significación estadística débil.

En prado y pasto la capacidad de infiltración con respecto a la humedad sugiere una mejor relación en ladera norte. En este caso, se observa una correlación claramente significativa con la Hi.sup ($R = 0,999$, $\sigma = 0,005$) y otras dos próximas a la significación estadística con la Hi.0-5 ($R = 0,989$, $\sigma = 0,096$) y Hi.5-10 ($R = 0,990$, $\sigma = 0,088$). En pasto sur los coeficientes de correlación lineal con la humedad antecedente no indican ninguna influencia sobre la tasa de infiltración media. Por otro lado, la relación con la RMS inicial es baja en ambos casos, lo cual es bastante previsible en suelos con cubierta vegetal. Las correlaciones estadísticamente significativas en prado norte entre Hi.0-5 y Hi.5-10 ($R = 0,999$, $\sigma = 0,007$) y en pasto sur entre Hi.sup y Hi.0-5 ($R = 0,999$, $\sigma = 0,010$) sugieren que la transferencia vertical y la capacidad de re-

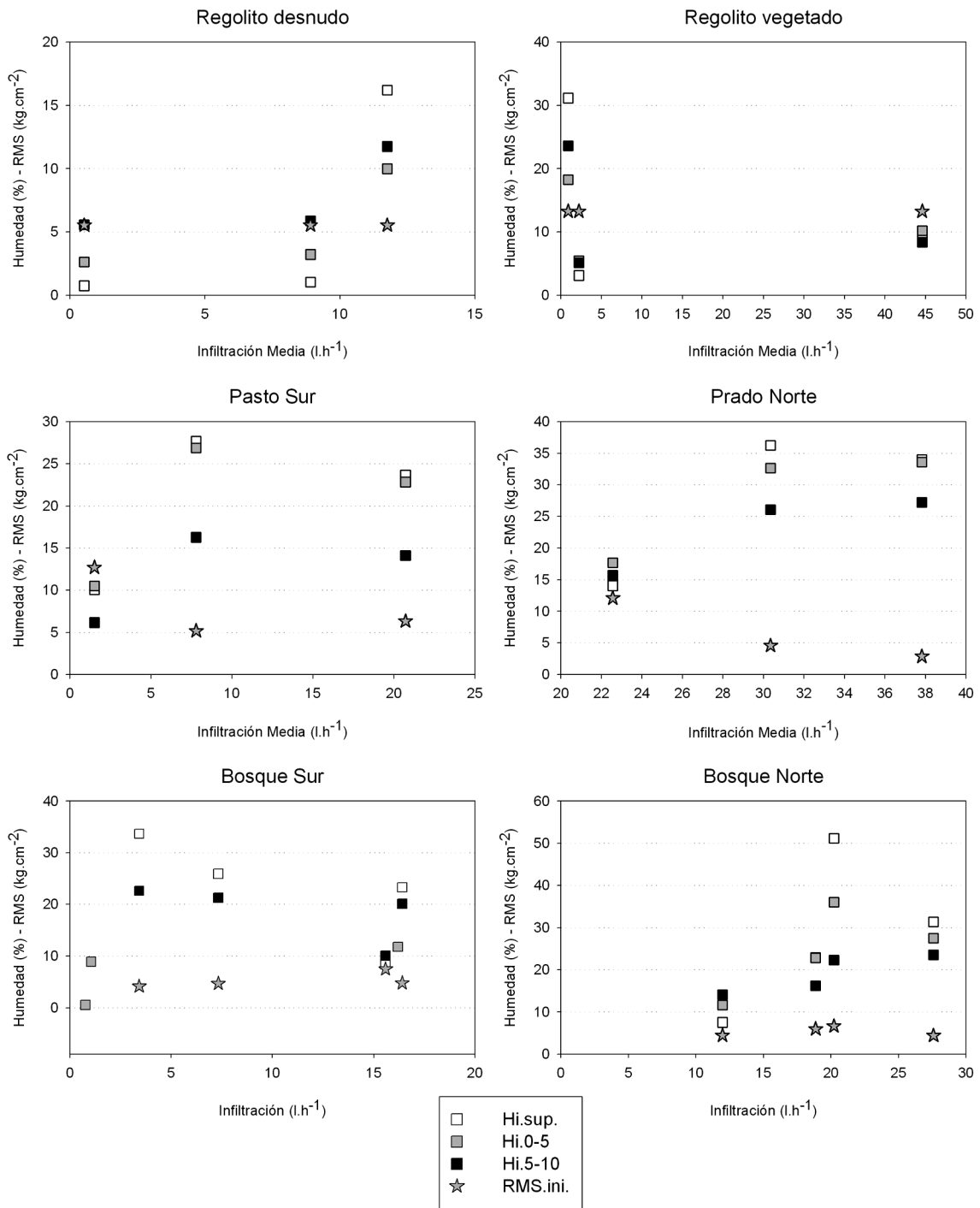


Figura 3. Relación entre las condiciones iniciales de humedad (Hi.sup., Hi.0-5 y Hi.5-10) y de resistencia mecánica superficial (RM.ini) con las tasas medias de infiltración (I-media).

Figure 3. Relationship between the initial moisture conditions (Hi.sup., Hi.0-5 and Hi.5-10) and surface mechanical resistance (RMS.ini) with mean infiltration rates (I-media).

tención hídrica posiblemente son algo mejores en los suelos situados en ladera norte.

Por último, las relaciones entre la infiltración media y las variables físicas en los suelos forestales probablemente sean las menos claras, tal y como se podía esperar previamente. Las menores diferencias entre las tasas de infiltración obtenidas en ladera norte y sur (Tabla 2), en comparación con las registradas en prado y pasto, es coherente con el mejor desarrollo y estructuración de sus suelos. Esto supone que la capacidad de infiltración de estos suelos forestales debería estar menos afectada por las condiciones físicas del horizonte más superficial. En este caso, las relaciones entre las variables del estado físico confirman este supuesto, ya que se limitan únicamente a una correlación significativa (1%) entre RMS y H.5-10 en bosque sur, y dos correlaciones débiles (5%) entre la Hi.sup y la Hi.0-5 en bosque norte ($R = 0,973$, $\sigma = 0,027$) y en bosque sur ($R = 0,979$, $\sigma = 0,021$), lo cual indica pequeñas diferencias entre las condiciones físicas en ambas situaciones, aunque algo más de variabilidad temporal en exposición sur. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que las diferencias físicas e hídricas detectadas entre los suelos de ambas laderas (Tablas 1 y 2), aún siendo moderadas, podrían causar un efecto hidrológico significativo si se considera un contexto espacial más amplio.

4.4. Análisis conjunto de los datos

El estudio conjunto de los datos se ha realizado a partir de obtener matrices de correlación lineal considerando las variables de los 20 ensayos. En este sentido, al utilizar un número mayor de casos que en los análisis realizados anteriormente, los resultados se pueden considerar más consistentes desde un punto de vista estadístico. Por un lado, se ha analizado la relación entre las tasas de infiltración (I-media, I-máxima e I-mínima), el uso del suelo (asignando valor decreciente de degradación 1 a 6), la exposición (1: sur y 2:

norte), el mes (1 a 12) y el estado físico (H.sup, H.0-5, H.5-10 y RMS) inicial y final. Por otro lado, se ha estudiado la dinámica de la capacidad de infiltración a partir de calcular el tiempo hasta alcanzar la tasa mínima de infiltración (T.inf.min) y la diferencia entre las tasas de infiltración inicial y final (Inf.ini-fin) y relacionarlas con los cambios que experimentan las concisiones físicas (Hv.sup, Hv.0-5, Hv.5-10 y RMS.var), y considerando también las variables de situación espacial (uso del suelo y exposición) y temporal (mes).

En la Tabla 3 se muestran los índices de correlación lineal de Pearson y la significación bilateral considerando las variables indicadoras del estado físico inicial del suelo, mientras la Tabla 4 presenta las relaciones con respecto al estado físico final. Asimismo, ambas tablas exponen las relaciones entre las variables espaciales (exposición y uso del suelo), temporal (mes) y las tasas de infiltración.

Las relaciones entre la I-mínima, I-media e I-máxima, la distribución temporal (mes) y las variables espaciales (exposición y usos de suelo) indican que la I-mínima está afectada por el uso del suelo (5%) y la exposición (5%), mientras la I-media se relaciona únicamente con la exposición (5%). Estos resultados sugieren que la I-máxima (inicial) es independiente del uso del suelo o de la exposición. En cualquier caso, la relación entre el uso del suelo e I-media indica que éste es un factor que afecta a la dinámica del proceso. Asimismo, la correlación de ambas variables espaciales con la I-mínima (final) confirma su influencia en la evolución temporal de la infiltración. Por otro lado, es importante observar que la I-media se correlaciona positivamente (1%) con las I-máxima e I-mínima, mientras las I-máxima e I-mínima son independientes. No obstante, es interesante constatar que el coeficiente de correlación entre I-media e I-mínima es sensiblemente mejor que entre I-media e I-máxima, lo que indica que la dinámica final del proceso es algo más determinante que la respuesta inicial, pero no se aprecia ninguna influencia

Tabla 3. Matriz de correlaciones lineales considerando las tasas de infiltración, las variables espacio-temporales y el estado físico inicial del suelo/regolito. (I: Infiltración; Hi: Humedad inicial; RMSini: Resistencia Mecánica Superficial inicial).

Table 3. Lineal correlation matrix taking into account infiltration rates, space-temporal variables and the initial physical conditions of the soil/regolith (I: Infiltration; Hi: Initial moisture; RMSini: Initial Surface Mechanical Resistance).

		Mes	ExpN/S	Uso	I-med	I-máx	I-mín	Hi.sup	Hi.0-5	Hi.5-10	RMSini
Mes	R	1	0,000	0,335	0,189	0,158	0,097	0,289	0,358	0,104	0,041
	s		1	0,149	0,424	0,506	0,685	0,217	0,121	0,664	0,864
ExpN/S	R	0,000	1	0,288	0,505*	0,2227	0,489*	0,297	0,303	0,342	0,028
	s	1		0,218	0,023	0,335	0,029	0,204	0,193	0,140	0,906
Uso	R	0,335	0,288	1	0,247	0,348	0,471*	0,515*	0,629**	0,572**	-0,376
	s	0,149	0,218		0,294	0,133	0,036	0,020	0,003	0,008	0,102
I-med	R	0,189	0,505*	0,247	1	0,592**	0,826**	0,236	0,386	0,313	-0,064
	s	0,424	0,023	0,294		0,006	0,000	0,361	0,093	0,180	0,789
I-máx	R	0,158	0,227	0,348	0,592**	1	0,351	-0,027	0,103	0,004	0,094
	s	0,506	0,335	0,133	0,006		0,129	0,911	0,665	0,986	0,693
I-mín	R	0,097	0,489*	0,471*	0,826**	0,351	1	0,424	0,622**	0,552*	0,300
	s	0,685	0,029	0,036	0,000	0,129		0,062	0,003	0,011	0,199
Hi. sup	R	0,289	0,297	0,515*	0,236	-0,027	0,424	1	0,916**	0,793**	-0,474*
	s	0,217	0,204	0,020	0,361	0,911	0,062		0,000	0,000	0,035
Hi. 0-5	R	0,358	0,303	0,629*	0,386	0,103	0,622**	0,916**	1	0,865**	-0,533*
	s	0,121	0,193	0,003*	0,093	0,665	0,003	0,000		0,000	0,016
Hi. 5-10	R	0,104	0,303	0,572*	0,313	0,004	0,552*	0,793**	0,865**	1	-0,711**
	s	0,664	0,193	0,008*	0,180	0,986	0,011	0,000	0,000		0,000
RM Sin	R	0,041	0,303	-0,376	-0,064	0,094	0,300	-0,474*	-0,533*	-0,711**	1
	s	0,864	0,193	0,102	0,789	0,693	0,199	0,035	0,016	0,000	

entre las fases inicial y final del proceso de infiltración.

Las relaciones entre las tasas de infiltración y las condiciones físicas iniciales (Tabla 3) indican que la I-mínima es la única variable dependiente. Así, las correlaciones positivas con Hi.0-5 (1%) y Hi.5-10 (1%) sugieren que el estado hídrico antecedente no afecta de manera determinante la capacidad de infiltración al inicio (I-máxima), pero probablemente condiciona de alguna manera su evolución temporal al mostrar un efecto sobre la capacidad final (I-mínima). Por otro lado, merece la pena destacar que el uso del suelo está correlacionado de manera positiva con la Hi.sup (5%), la Hi.0-5 (1%) y la Hi.5-10 (1%), lo que demuestra que existe un gradiente positivo entre el estado hídrico antecedente y las mejores condiciones del suelo: cárcava desnuda (1), cárcava cubierta (2), pasto sur (3), prado norte (4), bosque sur (5) y bosque norte (6).

La significación estadística creciente de los coeficientes negativos de correlación entre la RMS.ini con Hi.sup (5%), Hi.0-5 (5%) y Hi.5-10 (1%) demuestran dos aspectos que pueden ser considerados evidentes de antemano: que la compactación del terreno es inversamente proporcional a su estado hídrico y que posiblemente también causa algún efecto negativo en la capacidad de penetración del frente de humedad.

Las relaciones entre la I-mínima, I-media e I-máxima con las condiciones físicas finales (Tabla 4) muestran nuevamente que la I-mínima es la única variable relacionada. La correlación estadística débil (5%) con los tres valores de humedad final indican que existe una interacción positiva entre la evolución del estado hídrico del terreno y de la capacidad de infiltración final. Esto puede significar que la distribución más homogénea de la humedad está asociada a la mejor transmisividad

Tabla 4. Matriz de correlaciones lineales considerando las tasas de infiltración, las variables espacio-temporales y el estado físico final del suelo/regolito. (I: Infiltración; Hf: Humedad final; RMSfin: Resistencia Mecánica Superficial final).

Table 4. Lineal correlation matrix taking into account the infiltration rates, space-temporal variables and the final physical conditions of the soil/regolith (I: Infiltration; Hf: Final moisture; RMSfin: Final Surface Mechanical Resistance).

		Mes	Exp N/S	Uso	I-med	I-máx	I-mín	Hf. sup	Hf. 0-5	Hf. 5-10	RMSfin
Mes	R	1	0,000	0,335	0,189	0,158	0,097	0,054	0,124	-0,015	0,330
	σ		1	0,149	0,424	0,506	0,685	0,855	0,601	0,948	0,155
Exp N/S	R	0,000	1	0,288	0,505*	0,227	0,489*	0,456*	0,496*	0,679**	0,181
	σ		1	0,218	0,023	0,335	0,029	0,043	0,026	0,001	0,446
Uso	R	0,335	0,288	1	0,247	0,348	0,471*	0,263	0,296	0,545*	0,365
	σ	0,149	0,218		0,294	0,133	0,036	0,263	0,205	0,013	0,114
I-med	R	0,189	0,505*	0,247	1	0,592**	0,826**	0,370	0,404	0,369	0,046
	σ	0,424	0,023	0,294		0,006	0,000	0,108	0,078	0,109	0,847
I-máx	R	0,158	0,227	0,348	0,592**	1	0,351	0,257	0,248	0,240	0,194
	σ	0,506	0,335	0,133	0,006		0,129	0,274	0,293	0,309	0,412
I-mín	R	0,097	0,489*	0,471*	0,826**	0,351	1	0,504*	0,524*	0,472*	0,041
	σ	0,685	0,029	0,036	0,000	0,129		0,024	0,018	0,036	0,863
Hf. sup	R	0,054	0,456*	0,263	0,370	0,257	0,504*	1	0,839**	0,247	0,154
	σ	0,855	0,043	0,263	0,108	0,274	0,024		0,000	0,294	0,516
Hf. 0-5	R	0,124	0,496*	0,296	0,404	0,248	0,524*	0,839**	1	0,457*	0,284
	σ	0,601	0,026	0,205	0,078	0,293	0,018	0,000		0,043	0,225
Hf. 5-10	R	-0,015	0,679**	0,545*	0,369	0,240	0,472*	0,247	0,457*	1	0,157
	σ	0,948	0,001	0,013	0,109	0,309	0,036	0,294	0,043		0,509
RMSfin	R	0,330	0,181	0,365	0,046	0,194	0,041	0,154	0,284	0,157	1
	σ	0,155	0,446	0,114	0,847	0,412	0,863	0,516	0,225	0,509	

hídrica en condiciones de saturación. Los coeficientes de correlación entre los contenidos hídricos finales y la exposición, así como el incremento de la significación estadística desde la Hf.sup hasta la Hf.5-10, demuestran que la eficiencia del proceso de infiltración está muy relacionada con la orientación de las laderas y el estado de degradación del suelo, lo cual se manifiesta incluso en el nivel más superficial. La relación positiva (5%) entre el uso del suelo y la Hf.5-10 confirmaría esta observación.

La Tabla 5 presenta las relaciones estadísticas derivadas de relacionar dos variables que definen la dinámica temporal durante un mismo evento del proceso de infiltración (T.inf.min e Inf.ini-fin), dos variables relacionados con la distribución espacial (uso del suelo y exposición), una variable temporal (mes) y cuatro variables asociadas a las variaciones del es-

tado físico durante los ensayos (Hv.sup, Hv.0-5, Hv.5-10 y RMS.var). Las correlaciones positivas, aunque débiles (5%), entre el T.inf.min con la exposición N/S y el uso, confirman que la dinámica temporal del proceso está afectada por las características del terreno. Asimismo, la correlación positiva (1%) entre la Inf.ini-fin y la T.inf.min también podría sugerir que las variables espaciales ejercen cierta influencia en la dinámica del proceso de infiltración, a pesar de la ausencia de correlación estadística observada entre ellas. En cualquier caso, el T.inf.min también está correlacionado positivamente con la variación de la H.sup (5%) y de la H.0-5 (1%), de manera que las mayores variaciones de humedad superficial se suelen relacionar con las situaciones en que se producen los descensos más lentos de la capacidad de infiltración. Por otro lado, la variación de la RMS está correlacionada positivamente (1%) con el uso del suelo y la ex-

Tabla 5. Matriz de correlaciones lineales considerando las variables espacio-temporales, dos indicadores relacionados con la evolución temporal de la infiltración y los cambios de las propiedades físicas del suelo/regolito. (T.inf.min: Tiempo hasta la infiltración mínima; Inf.ini-fin: Variación de la velocidad de infiltración; Hv: variación de la humedad; RMSvar: variación de la Resistencia Mecánica Superficial).

Table 5. Lineal correlation matrix taking into account the space-temporal variables, two indexes related with the temporal evolution of infiltration and the variation of physical properties of soil/regolith (T.inf.min: Time to minimum infiltration rate; Inf.ini-fin: infiltration speed difference; Hv: moisture variation; RMSvar: variation of Surface Mechanical Resistance Variation).

		Mes	ExpN/S	Uso	T.inf.min	Inf.ini-fin	Hv.sup	Hv.0-5	Hv.5-10	RMSvar
Mes	R	1	0,000	0,335	0,088	0,176	-0,131	-0,240	-0,211	0,101
	σ		1	10,149	0,713	0,459	0,583	0,307	0,365	0,671
Exp N/S	R	0,000	1	0,288	0,458*	0,210	0,257	0,357	0,546*	0,050
	σ		1	0,218	0,042	0,375	0,273	0,122	0,013	0,836
Uso	R	0,335	0,288	1	0,556*	0,339	0,347	0,351	-0,025	0,547*
	σ	0,149	0,218		0,011	0,143	0,134	0,129	0,918	0,013
T-inf.min	R	0,088	0,458*	0,556*	1	0,868**	0,492*	0,601**	0,327	0,100
	σ	0,713	0,042	0,011		0,000	0,027	0,005	0,160	0,674
Inf.ini-fin	R	0,176	0,210	0,339	0,868**	1	0,171	0,379	0,239	-0,032
	σ	0,459	0,375	0,143	0,000		0,472	0,099	0,311	0,894
Hv.sup	R	-0,131	0,257	-0,091	0,492*	0,177	1	0,854**	0,264	-0,248
	σ	0,583	0,273	0,703	0,027	0,472		0,000	0,261	0,293
Hv.0-5	R	-0,240	0,357	0,351	0,601**	0,379	0,854**	1	0,418	-0,180
	σ	0,307	0,122	0,129	0,005	0,099	0,000		0,067	0,447
Hv5-10	R	-0,211	0,546*	-0,025	0,327	0,239	0,264	0,418	1	-0,065
	σ	0,365	0,013	0,918	0,160	0,311	0,261	0,067		0,785
RMSvar	R	0,101	0,050	0,547*	0,100	-0,032	-0,248	-0,180	-0,065	1
	σ	0,671	0,836	0,013	0,674	0,894	0,293	0,447	0,785	

posición N/S se relaciona de manera débil (5%) con la Hv.5-10. Toda esta información demuestra que los cambios que experimenta el estado físico del suelo, derivados de realizar ensayos de infiltración en condiciones de saturación, están bastante condicionados por el uso del suelo y su exposición, incluso si se considera que la Hv.sup y la Hv.0-5 no ha mostrado ninguna relación estadísticamente significativa con las mencionadas variables de situación espacial.

5. Discusión

5.1. Efecto del estado físico del suelo en la capacidad de infiltración.

La relación entre las condiciones físicas (humedad y RMS) y la capacidad media de infiltración para cada uso del suelo (Fig. 3) ha

revelado escasas correlaciones estadísticamente significativas, probablemente como consecuencia del reducido número de casos considerados en este estudio. Sin embargo, al realizar el análisis considerando el conjunto total de datos (Tablas 3, 4 y 5) se han obtenido varias relaciones claramente significativas, que indican algunas influencias del estado físico, tanto en la capacidad de infiltración, como en la propia dinámica del proceso. En primer lugar, se ha constatado que tanto el estado físico inicial como sus cambios estacionales están muy relacionados con el grado de degradación del suelo. Así, la capacidad de infiltración en los ambientes más degradados ha mostrado una mayor susceptibilidad frente a los cambios físicos. Las varianzas estimadas para las tasas medias de infiltración (Tabla 2) confirman que las mayores diferencias estacionales se encuentran en los ambientes más degradados, que se asocian a

los mayores contrastes de las condiciones físicas (Tabla 1). Estos resultados son coherentes con los obtenidos en otros estudios, en los que se observa que la interrelación entre parámetros físicos del suelo afecta la respuesta hídrica de las laderas (Farres, 1987; Rawls *et al.*, 1993; Cerdá, 1996).

En cárcavas, en estudios basados en ensayos de simulación de lluvia, no se han encontrado buenas relaciones estadísticas entre las condiciones físicas antecedentes y la capacidad de infiltración (Regüés y Gallart, 2004; Nadal-Romero y Regüés, 2009). En estos ambientes, las situaciones de mayor humedad se asocian habitualmente con valores de densidad aparente y RMS bajos, que corresponden a un regolito muy desarrollado y abierto, mientras los menores contenidos de humedad coinciden con una mayor densidad aparente y RMS, típicos del regolito compacto y encostado. Sin embargo, estas relaciones pueden cambiar rápidamente e invertirse en determinados momentos, como consecuencia de la fuerte dinámica temporal que muestra la superficie del regolito (Regüés, 1995; Regüés *et al.*, 1995; Nadal-Romero *et al.*, 2007; Nadal-Romero, 2008). Esto explica la baja significación estadística en la relación inversa entre la tasa de infiltración media y la RMS, en la relación directa con las humedades y la relación inversa entre las humedades y la RMS (Fig. 3). Por otro lado, destaca el menor número de relaciones obtenido en el regolito vegetado, demostrando la influencia que ejerce la cubierta vegetal en la dinámica superficial de sus propiedades físicas e hidrológicas.

En los prados y pastos asociados a campos abandonados (cuenca de Arnás), los estudios previos indican que los suelos de la vertiente sur (pastos) están menos desarrollados, peor estructurados y son menos profundos que en la vertiente norte (prados), condicionando sus propiedades hídricas (Navas *et al.*, 2008; Seeger *et al.*, 2006). Asimismo, se ha observado que el factor más relacionado con la respuesta hidrológica es la humedad antecedente del suelo (Lana-Renault *et al.*, 2007).

Las diferencias hídricas e hidrológicas observadas entre las vertientes norte y sur (Tablas 1 y 2) se pueden relacionar con esta información. Por un lado, los contenidos hídricos antecedente y posterior son sensiblemente más bajos en pasto sur y, por otro lado, las correlaciones más claras se obtienen con los resultados del prado norte entre la tasa media de infiltración y los valores de humedad previa. Estas observaciones sugieren que las condiciones físicas favorecen más la transferencia hídrica en el prado norte. Esto es una consecuencia del efecto positivo que produce la humedad en la capacidad de infiltración (Kirkby, 1978), que se ha asociado a una mayor resistencia frente a la erosión por salpicadura (Regüés y Torri, 2002), lo cual favorece la presencia de grietas y macroporos superficiales, que mejoran la conductividad hidráulica (Lin *et al.*, 1998).

En el ambiente forestal, la capacidad de infiltración muestra la mayor independencia con respecto a las condiciones físicas superficiales. Las condiciones físicas iniciales y finales (Tabla 1), las tasas de infiltración (Tabla 2) y las relaciones entre dichas variables (Tablas 3, 4 y 5) muestran mayor homogeneidad, entre las laderas norte y sur, que la observada entre prado norte y pasto sur. Sin embargo, el análisis de las variables ha revelado que el suelo de la ladera sur es algo más susceptible a experimentar variaciones estacionales de las condiciones físicas superficiales. En este sentido, tanto la correlación entre $H_{i.0-5}$ y RMS_{ini} en bosque sur, como las diferencias entre los valores de humedad (Tabla 1), son factores que permiten explicar la mayor variabilidad temporal de las tasas de infiltración en ladera sur (Tabla 2). En cualquier caso, los resultados confirman que las propiedades físicas e hídricas de los suelos forestales son más estables que en otros ambientes (Price *et al.*, 2010).

5.2. Efecto hidrológico de los usos del suelo.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de infiltración en distintas situaciones de

uso del suelo son acordes con la información expuesta en varios estudios antecedentes. Estos son los aspectos más destacados de estas similitudes: tanto la capacidad de infiltración como la conductividad saturada (Ksat) son especialmente sensibles a los cambios de uso del suelo (Alegre y Cassel, 1996; Schoenholtz *et al.*, 2000; Zimmermann *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2009), los cambios de uso afectan más a las propiedades hídras en superficie que en profundidad (Lal, 1996; Moraes *et al.*, 2006, Zimmermann *et al.*, 2006, Zimmermann y Elsebeer, 2008), las propiedades físicas e hidráulicas se mantienen más constantes en profundidad en los suelos forestales que en los prados y pastos (Price *et al.*, 2010), la Ksat disminuye en la conversión de suelo forestal a prado (Alegre y Cassel, 1996; Martínez y Zinck, 2004; Price *et al.*, 2010), la recuperación de la Ksat tras el abandono del pastoreo (Godsey y Elsenbeer, 2002; Zimmermann *et al.*, 2006, Zimmermann y Elsenbeer, 2008), la respuesta hidrológica en cárcavas depende de la evolución de las propiedades física del regolito (Regüés y Gallart, 2004; Nadal-Romero y Regüés, 2010), la variabilidad temporal de la conductividad hidráulica superficial puede ser mayor a la observada entre distintos usos del suelo (Zhou *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2009).

En este estudio se ha registrado una heterogeneidad de las tasas de infiltración entre usos del suelo de magnitud similar o incluso superior a la variabilidad temporal que muestra un mismo uso (Tabla 2). Las diferencias más significativas se han relacionado con las situaciones de mayor degradación (regolito y pasto sur) donde la varianza estimada entre las tasas de infiltración media, máxima y mínima es de rango igual o mayor a sus valores promedio, siendo sensiblemente inferiores a los ambientes semejantes pero menos degradados (regolito con cubierta vegetal y prado norte) y a los suelos en ambiente forestal. Este resultado sería equiparable al obtenido por Ziegler *et al.* (2004), que observan una reducción de la conductividad hidráulica directamente proporcional al grado de degradación del suelo.

Por otro lado, el análisis conjunto de todos los datos ha proporcionado información significativa, con respecto al efecto de las condiciones físicas de los usos del suelo en la infiltración. Así, la correlación positiva entre las variables de carácter espacial con la I-media, I-mínima y T.inf.min (Tablas 3, 4 y 5) demuestra que esta relación causa-efecto está asociada principalmente a la evolución y la fase final de la infiltración, mientras la independencia observada con la I-máxima confirmaría que el uso del suelo no interfiere de manera significativa en la respuesta inicial del proceso. Asimismo, la correlación entre la I-mínima y la humedad (inicial y final) sugiere que las condiciones hídras son más determinantes en la fase final del proceso de infiltración que la inicial. En este sentido, Zhou *et al.* (2008) observan que el estado hídrico inicial es una de las variables que más influyen en la evolución temporal de la conductividad hidráulica superficial. Sin embargo, en otro estudio reciente no se ha encontrado relación entre ambas variables (Hu *et al.*, 2009). En cualquier caso, las condiciones hídras iniciales están correlacionadas positivamente con el uso del suelo (Tabla 3) demostrando que el escenario más degradado (1: cárcava) es menos conservativo que el suelo más natural (6: bosque norte). Asimismo, las correlaciones positivas entre la exposición (1: sur y 2: norte) y los valores finales de humedad pueden interpretarse como un indicador de una mejor capacidad de transferencia vertical del agua en ladera norte.

Estos resultados demuestran que las diferencias entre usos del suelo afectan principalmente a la evolución temporal del proceso, pero no causan un efecto significativo sobre los valores iniciales de la infiltración. Los trabajos de Zimmermann *et al.* (2006) y Malmer y Grip (1990) ilustran situaciones similares, al no encontrar diferencias significativas en las tasas máximas de infiltración en suelos afectados por deforestación. Sin embargo, la alta correlación entre la T.inf.min y la inf.ini-fin (Fig. 4) sugiere que el uso del suelo también debe causar algún efecto sobre el gradiente entre la infiltración inicial y final.

Las observaciones derivadas de este estudio son coherentes con los procesos asociados a la respuesta hidrológica identificados en las cuencas experimentales de Araguás, Arnás y San Salvador (García-Ruiz *et al.*, 2008): la generación de escorrentía en cárcavas está asociada básicamente a una repuesta de tipo Hortoniano, especialmente cuando el regolito presenta la superficie encostrada o sellada (Regüés *et al.*, 2000; Nadal-Romero *et al.*, 2009); en ambientes afectados por el abandono de cultivos y la deforestación los mecanismos de generación de escorrentía pueden ser distintos, dependiendo del estado de conservación de los suelos, con una tendencia a la saturación en las laderas con suelos más desarrollados y a la superación de la

capacidad de infiltración en las áreas más degradadas de la laderas (Lana-Renault, 2011); el análisis de las curvas de histéresis ha proporcionado las mismas conclusiones (Lana-Renault y Regüés, 2009); mientras el estudio hidrológico en la cuenca de San Salvador, de ambiente forestal, indica que el factor más determinante es el caudal de base antecedente (Serrano-Muela *et al.*, 2008a) y, por consiguiente, la escorrentía procede casi exclusivamente de flujos subterráneos (Serrano Muela *et al.*, 2010) en acuerdo con las observaciones de investigaciones previas (Freeze, 1972; Beven, 1982). Asimismo, se ha constatado la gran importancia del bosque en la regulación de la respuesta hidrológica, tanto por el efecto protector o conservador que

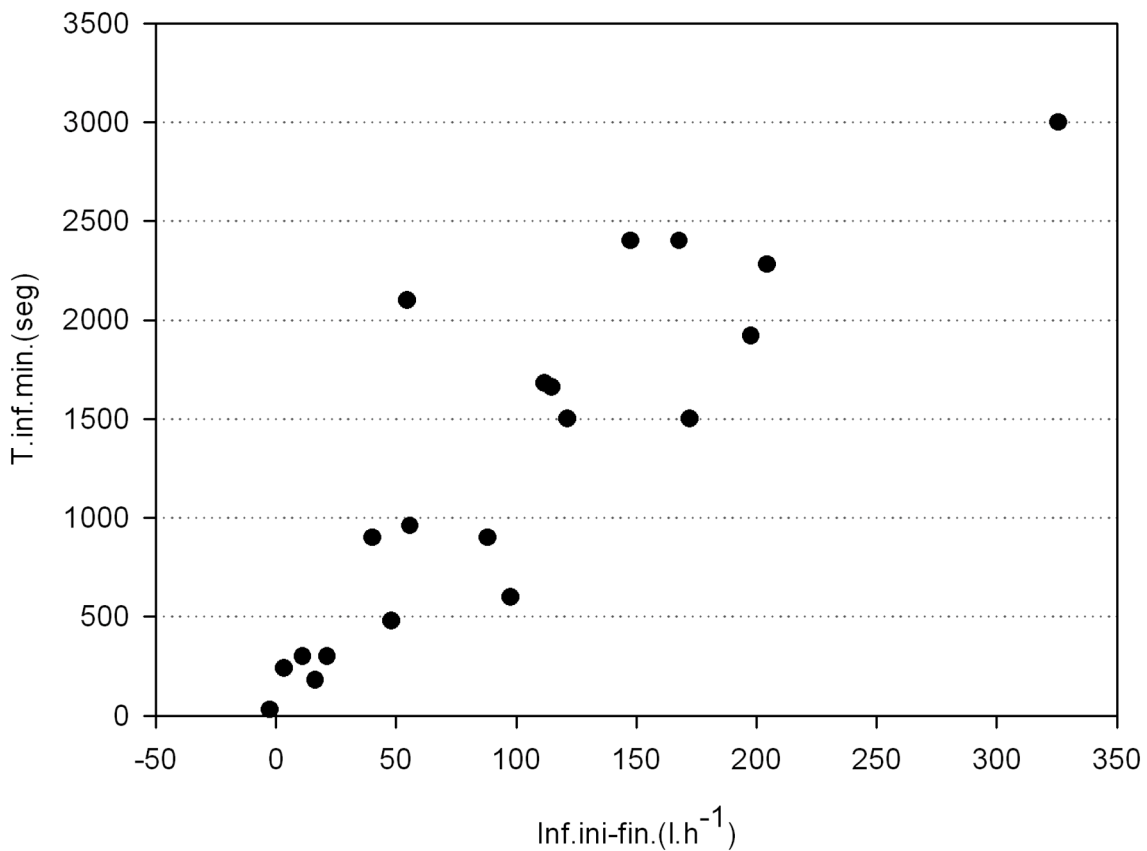


Figura 4. Relación entre el tiempo hasta la infiltración mínima (T.inf.min) y la variación de la velocidad de infiltración (Inf.ini-fin) para cada ensayo.

Figure 4. Relationships between the time to minimum infiltration rate (T.inf.min) and the variation of infiltration speed (Inf.ini-fin) for each experience.

ejerce en sus suelos (Godsey y Elsenbeer, 2002) como por las consecuencias derivadas de la interceptación de las precipitaciones (Serrano-Muela *et al.*, 2008b).

Estas relaciones entre usos del suelo y sus características respuestas hidrológicas son fácilmente asimilables a los resultados obtenidos en distintos estudios hidrológicos. Así, se ha demostrado que la deforestación causa una reducción de la capacidad de infiltración (Ghuman *et al.*, 1991), una mayor persistencia de niveles freáticos colgados en superficie (Rochefeller *et al.*, 2004) y un incremento de las áreas donde el nivel freático aflora en superficie (Cox *et al.*, 1996). Estos aspectos son compatibles con los mecanismos de generación de escorrentía identificados en las mencionadas cuencas experimentales. En la cuenca de Arnás (campos abandonados), la magnitud de la respuesta hidrológica está muy relacionada a la aparición de áreas saturadas en superficie, como consecuencia de la dinámica estacional del nivel freático (Lana-Renault *et al.*, 2007), lo cual afecta especialmente a los campos abandonados ocupados por prados y pastos. Mientras en la cuenca forestal de San Salvador la ausencia de prados y pastos prácticamente imposibilita la capacidad de saturación superficial de los suelos, lo cual se manifiesta tanto en oscilaciones muy rápidas del nivel freático como en éste que no alcance en ninguna circunstancia la superficie (Serrano-Muela *et al.*, 2010). En este sentido, el trabajo de Germen *et al.* (2010) concluye que bosque y prado difieren principalmente en la manera en que el agua se mueve por el subsuelo, lo cual se pone de manifiesto en la evolución temporal del nivel freático, que fluctúa mucho más deprisa en ambientes forestales que en prados o pastos.

6. Conclusiones

La exposición de las laderas y los usos del suelo se han revelado como dos factores muy determinantes para explicar la variabilidad

temporal de la capacidad de infiltración. Esto se debe asociar con la estrecha influencia que existe entre dichos factores y los cambios estacionales del estado físico del suelo. Los cambios temporales/estacionales del estado físico del suelo afectan de manera más directa a los escenarios con mayor degradación. Esto se manifiesta en una mayor variabilidad temporal de las tasas de infiltración (máxima, media y mínima). El efecto de los usos del suelo y de la exposición de las laderas se refleja especialmente en las tasas iniciales de infiltración, aunque también se manifiesta en la dinámica que experimenta el proceso de infiltración durante un mismo evento.

La capacidad de infiltración inicial muestra mayor independencia respecto del estado de degradación del suelo que la observada a lo largo del propio proceso, o en su fase final. Tanto la velocidad de descenso de la capacidad de infiltración como el valor mínimo/final (condiciones de saturación) parecen estar algo más afectados por el estado de degradación que el valor máximo o inicial de infiltración. La variabilidad espacial y temporal de la capacidad de infiltración produce un efecto directo en los procesos de generación de escorrentía. Esto se pone de manifiesto en las características de la respuesta hidrológica identificadas en cuencas con distintos usos del suelo y cubierta vegetal. Los resultados obtenidos en este estudio, a pesar de ser coherentes con los obtenidos en otros estudios, deben ser valorados con cautela dado el número escaso de ensayos que se realizaron.

Agradecimientos

Este estudio se ha financiado mediante fondos del proyecto CETSUS (CGL2007-66644-C04-01/HID) del Plan Nacional I+D+I 2004-2007 (Ministerio de Ciencia e Innovación). El mantenimiento y parte de la monitorización de las cuencas experimentales se ha logrado a partir de la financiación proporcionada por el convenio RESEL (Ministerio del Medio Ambiente-CSIC). E. Nadal-Romero y N. Lana-Renault contaron durante 2009 y 2010 con un contrato postdoctoral del Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante el Programa Nacional de Movilidad de

Recursos Humanos del Plan nacional de I-D+I 2008-2011 y en la actualidad están contratadas gracias al programa Postdoctoral Juan de la Cierva (Ministerio de Ciencia e Innovación).

Bibliografía

- Alegre, J.C.; Cassel, D.K. (1996). Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 58 (1), 39-48.
- Andréassian, V. (2004). Water and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291 (1-2), 1-27.
- Beguería, S.; López-Moreno, J.I.; Lorente, A.; Seeger, M.; García-Ruiz, J.M. (2003). Assessing the effect of climate and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32 (4), 283-286.
- Beven, K. (1982). On subsurface stormflow: an analysis of response times. *Hydrological Sciences Journal*, 27 (4), 505-521.
- Bormann, H.; Klaassen, K. (2008). Seasonal and land use dependence variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two northern German soils. *Geoderma*, 145 (3-4), 295-302.
- Bosch, J.M.; Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4), 3-23.
- Brown, A.E.; Zhang, L.; McMahon, T.A.; Western, A.W.; Vertessy, R.A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310 (1-4), 28-61.
- Cerdá, A. (1996). Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. *Soil Technology*, 9 (3), 133-140.
- Cox, J.W.; Fritsch, E.; Fitzpatrick, R.W. (1996). Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes. 7. Water Duration. *Australian Journal of Soil Research*, 34 (6), 803-824.
- Creus, J. (1983). *El clima del Alto Aragón Occidental*. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, Jaca (Huesca), 109 pp.
- Farres, (1987). The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14 (1-3), 119-130.
- Freeze, R.A. (1972). Role of subsurface flow in generating surface runoff 2. Upstream source areas. *Water Resource Research*, 8 (5), 1272-1283.
- Gallart, F.; Llorens, P. (2003). Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28 (3), 334-340.
- Gallart, F.; Balasch, J.C.; Regüés, D.; Soler, M.; Castelltort, X. (2005). Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment. The Vallcebre research basins (southeastern Pyrennes) II: Temporal and spatial dynamics of erosion and stream sediment transport. En: *Catchment dynamics and River Processes: Mediterranean and other Climate Regions* (C. García; R.J. Batalla, eds.). Elsevier, 17-29.
- Gallart, F. (2009). Algunos criterios topográficos para identificar el origen antrópico de las cárcavas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2), 215-221.
- García-Ruiz, J.M.; Balcells, E. (1978). Tendencias actuales en la ganadería del Alto Aragón. *Estudios Geográficos*, 153, 539-560.
- García-Ruiz, J.M.; Lasanta, T. (1990). Land-use changes in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10 (3), 267-279.
- García-Ruiz, J.M.; Regüés, D.; Alvera, B.; Lana-Renault, N.; Serrano-Muela, P.; Nadal-Romero, E.; Navas, A.; Latron, J.; Martí-Bono, C. (2008). Flood generation and sediment transport at catchment scale: a gradient of experimental catchments in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356 (1-2), 245-260.
- García-Ruiz, J.M.; Lana-Renault, N.; Beguería, S.; Lasanta, T.; Regüés, D.; Nadal-Romero, E.; Serrano-Muela, P.; López-Moreno, J.I.; Alvera, B.; Martí-Bono, C.; Alatorre, L.C. (2010). From plot to regional scales: Interactions of slope and catchment hydrological and geomorphic processes in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 120 (3-4), 248-25.
- García-Ruiz, J.M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81 (1), 1-11.
- Germer, S.; Neill, Ch.; Krusche, A.V.; Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use changes on near-surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology*, 380 (3-4), 473-480.
- Ghuman, B.S.; Lal, R.; Shearer, W. (1991). Land cleaning and use in the humid Nigerian tropics. I. Soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55 (1), 178-183.
- Godsey, S.; Elsenbeer, H. (2002). The soil hydrologic response to forest regrowth: a case study from southwestern Amazonia. *Hydrological Processes*, 16 (7), 1519-1522.
- Hopmans, J.W.; Schukking, H.; Torfs, P.J.J.F. (1988). Two-dimensional steady state unsaturated water flow in heterogeneous soils with autocorrelated soil hydraulic properties. *Water Resource Research*, 24 (12), 2005-2017.
- Hu, W.; Shao, M.; Wang, Q.; Fan, J.; Horton, R. (2009). Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, 149 (3-4), 355-366.
- Kirkby, M.J. (1978). *Hillslope Hydrology*. Wiley-Intersciences, Norwich, 389 pp.
- Lal, R. (1996). Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. 1. Soil physical and hydrological properties. *Land Degradation & Development*, 7 (1), 19-45.
- Lana-Renault, N.; Latron, J.; Regüés, D. (2007). Streamflow response and water-table dynamics in a sub-

- Mediterranean research catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 347 (3-4), 497-507.
- Lana-Renault, N. (2011). *El efecto de los cambios de cubierta vegetal en la respuesta hidrológica y sedimentológica de áreas de montaña: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 189 pp.
- Lana-Renault, N.; Regüés, D.; Nadal-Romero, E.; Serrano-Muela, P.; García-Ruiz, J.M. (2010). Streamflow response and sediment yield after farmland abandonment: results from a small experimental catchment in the central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 165 (9), 97-114.
- Lana-Renault, N.; Regüés, D., (2009). Seasonal patterns of suspended sediment transport in an abandoned farmland catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (9), 1291-1301.
- Lasanta, T. (1988). The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132, 15-36.
- Li, Y.X.; Tullberg, J.N.; Freebairn, D.M.; Li, H.W. (2009). Functional relationships between oil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil & Tillage Research*, 104 (1), 156-163.
- Lin, H.S.; McInnes, K.J.; Wilding, L.; Hallmarck, C.T. (1998). Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vatic integrades. *Soil Science*, 163 (1), 2-8.
- López-Moreno, N.; Beguería, S.; García-Ruiz, J.M. (2006). Trends in the high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change? *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, 15 (6), 1039-1050.
- Malmer, A.; Grip, H. (1990). Soil disturbance and loss of infiltrability caused by mechanized and manual extraction of tropical rain-forest in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 38 (1-2), 1-12.
- Mallants, D.; Mohanty, B.P.; Jacques, D.; Feyen, J. (1996). Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Science*, 161 (3), 167-181.
- Martínez, L.J.; Zinck, J.A. (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil and Tillage Research*, 75 (1), 3-18.
- Mishra, S.K.; Tyagi, J.V.; Singh, V.P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*, 17 (13), 2629-2652.
- Molinillo, M.; Lasanta, T.; García-Ruiz, J.M. (1997). Managing Mountainous Degraded Landscapes after Farmland Abandonment in the Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 21(4), 587-598.
- Moraes, J.M.; Schuler, A.E.; Dunne, T.; Figueiredo, R.O.; Victoria, R.L. (2006). Water storage and runoff processes in plinthic soils under Forest and pasture in eastern Amazonia. *Hydrological Processes*, 20 (12), 2509-2526.
- Moret, D.; Arrúe, J.L. (2007). Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil & Tillage Research*, 96 (1-2), 103-113.
- Nadal-Romero, E.; Regüés, D.; Martí-Bono, C.; Serrano-Muela, P. (2006). Dinámica estacional de los procesos de meteorización en cárcavas del Pirineo Central. *Cuaternario y Geomorfología*, 20 (1-2), 61-77.
- Nadal-Romero, E. (2008). *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo Central*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 433 pp.
- Nadal-Romero, E.; Regüés, D.; Martí-Bono, C.; Serrano-Muela, P. (2007). Badlands dynamics in the Central Spanish Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (6), 888-904.
- Nadal-Romero, E.; Regüés, D. (2009). Detachment and infiltration variations as consequence of regolith development in a Pyrenean badland system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (6), 824-838.
- Navas, A.; Machín, J.; Beguería, S.; López-Vicente, M.; Gaspar, L. (2008). Soil properties and physiographic factors controlling the natural vegetation re-growth in a disturbed catchment of the Central Spanish Pyrenees. *Agroforest Systems*, 72, 173-185.
- Poyatos, R.; Latron, J.; Llorens, P. (2003). Land use and land cover change after farmland abandonment. The case of a Mediterranean Mountain area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23 (4), 362-368.
- Price, K.; Jackson, C.R.; Parker, A.J. (2010). Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. *Journal of Hydrology*, 383 (3-4), 256-268.
- Rawls, W.J.; Ahuja, L.R.; Brakensiek, D.; Shirmohammadi, A. (1993). Infiltration and soil water movement. In: *Handbook of Hydrology* (D. Maidment, eds.), McGraw-Hill, New York, 5.1-5.51.
- Regüés, D. (1995). *Meteorización física en relación con los procesos de transporte y producción de sedimento en un área acaravada*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 302 pp.
- Regüés, D.; Pardini G.; Gallart, F. (1995). Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrocks as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*, 25 (1-4), 199-212.
- Regüés D.; Torri D. (2002). Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo arcilloso sin vegetación. *Cuaternario y Geomorfología*, 16 (1-4), 57-71.
- Regüés, D.; Gallart, F. (2004). Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in mediterranean mountain conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (6), 755-767.

- Regüés, D.; Nadal-Romero, E.; Latron, J.; Martí-Bono, C. (2009). Producción y transporte de sedimento en cárcavas desarrolladas en la Depresión Interior Altoaragonesa (Cuenca de Aragón, Pirineo Central). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2), 263-288.
- Remacha, E.; Arbués, P.; Carreras, M. (1987). Precisiones sobre los límites de la secuencia deposicional de Jaca. Evolución de las facies desde la base de la secuencia hasta el techo de la Arenisca de Sabiñánigo. *Boletín Geológico y Minero*, 98, 40-48.
- Rocheffeller, S.L.; McDaniel, P.A.; Falen, A.L. (2004). Perched water table responses to forest clearing in northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (1), 168-174.
- Sahin, V.; Hall, M.J. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178 (1-4), 293-309.
- Schoenholtz, S.H.; Van Miegroet, H.; Burger, J.A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138 (1-3), 335-356.
- Seeger, M.; Errea-Abad, M.P.; Lana-Renault, N. (2006). Spatial distribution of soils and their properties as indicators of degradation/regeneration processes in a highly disturbed Mediterranean Catchment. *Journal of Mediterranean Ecology*, 6 (1), 53-59.
- Serrano-Muela, P.; Lana-Renault, N.; Nadal-Romero, E.; Regüés, D.; Latron, J.; Martí-Bono, C.; García-Ruiz, J.M. (2008a). Forests and their hydrological effect in Mediterranean mountains: The case of the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 28 (3), 279-285.
- Serrano-Muela, P.; Regüés, D.; Lana-Renault, N.; Nadal-Romero, E. (2008b). Estudio de la trascolación bajo diferentes tipos de cubierta forestal durante el periodo fenológico con hojas en el Pirineo Central Español. En: *Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008* (J. Benavente; F.J. Gracia, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, Cádiz, 101-104.
- Serrano-Muela, P.; Regüés, D.; Nadal-Romero, P. (2010). La variabilidad temporal de la respuesta hidrológica de una pequeña cuenca mediterránea forestada del Pirineo Central. *Pirineos*, 165, 193-213.
- Sisson, J.B.; Wierenga, P.J. (1981). Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Science Society of American Journal*, 45 (4), 699-704.
- Soler, M.; Puigdefábregas, J. (1970). Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 96, 5-20.
- Stednick, J.D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176 (1-4), 79-95.
- Strock, J.S.; Cassel, D.K.; Gumpertz, M.L. (2001). Spatial variability of water and bromide transport through variably saturated soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (6), 1607-1617.
- Trimble, S.W.; Weirich, F.H.; Hoag, B.L. (1987). Reforestation and the reduction of water yield on the southern piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, 23 (3), 425-437.
- Vicente-Serrano, S.M.; Lasanta, T.; Romo, A. (2004). Analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish Central Pyrenees: the role of human management. *Environmental Management*, 34 (6), 802-818.
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; Lasanta, T. (2006). Diversidad espacial de la actividad vegetal en campos abandonados del Pirineo Central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes Landsat (1984-2001). *Pirineos*, 161, 59-84.
- Zhou, X.; Lin, H.S.; White, E.A. (2008). Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena*, 73 (1), 180-188.
- Zimmermann, B.; Elsenbeer, H.; De Moraes, J.M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, 222 (1-3), 29-38.
- Zimmermann, B.; Elsenbeer, H. (2008). Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients. *Journal of Hydrology*, 361 (1-2), 78-95.
- Ziegler, A.D.; Giambelluca, T.W.; Tran L.T.; Vana, T.T.; Nullet, M.A.; Fox, J.; Wien, T.D.; Pinthong, J.; Maxwell, J.F.; Evett, S. (2004). Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *Journal of Hydrology*, 287 (1-4), 124-146.