

Efectos del manejo del suelo en la infiltración en una aforestación con *Quercus ilex* L. en un área semiárida de agricultura de temporal

Raquel Sánchez-Andrés^{1*}, Salvador Sánchez-Carrillo¹, Agustín Sánchez-López², Manuel Benítez-Gilabert² y Luis Carlos Alatorre¹

¹Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora,
5 de febrero 818 Sur, Cd. Obregón, Sonora, 85000 México

²Centro de Ciencias Medioambientales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas,
Serrano 115 dpdo, 28006-Madrid, España.

Recibido 17 agosto 2004, revisado 25 noviembre 2004, aceptado 1 diciembre 2004

Effects of soil management on infiltration in a Quercus ilex L. afforestation in a semi-arid agricultural rain-fed land

Abstract

The aim of this study was to determine the effects that soil management exerts over infiltration process in a *Quercus ilex* experimental afforestation, considering whether a most effective water use by plants (i.e. more growth) came conditioned by an increase in the water inputs to the soil system from infiltration. Three soil management experiments were established in afforested plots: mechanical weeding (rotivator), chemical weeding (glyphosate) and non-treatment. A control plot was included to observe the effects occurring when a land use is taken. Results show that infiltration rates depend more on intrinsic soil properties than on soil management. Spatial variability appears related to microtopography where the highest infiltration rates were registered in low areas. Final constant infiltration rates were lower on the mechanical weeding and control than on chemical weeding and non-treatment plots. However, comparatively, in the mechanical and chemical weeding, constant infiltration rates appeared before, indicating a quick advance of the soil humidity front conditioned by the soil treatment. When no mechanical management was applied to the soil, the spatial heterogeneity in infiltration was increased. No significant relationships were asserted between infiltration rates and soil porosity (>10 mm). Neither appeared between soil water content and time until constant infiltration rate. The most significant control on infiltration was due to soil water content at 15-30 cm depth. Negative gradient on soil water content decreased the infiltration rates. Finally, simple estimates on infiltration rates based on soil moisture and quick drainage porosity increase our accuracy on soil water flow predictions.

Keywords: Soil management, infiltration, double ring infiltrometer, afforestation, semi-arid, land use change.

* Autor para correspondencia:

E-mail: rsanchez@itson.mx; Tel: +52-644-4100923; Fax: +52-644-4100910

Introducción

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo, a través de aberturas y poros de tamaño variable, en sentido descendente (Selby, 1970). La tasa de infiltración se define como el flujo de agua por unidad de tiempo que penetra desde la superficie del suelo. En condiciones naturales, esta entrada no sólo depende de las características intrínsecas del medio, principalmente porosidad y granulometría, sino también de las fuerzas derivadas de la gravedad y la presión capilar asociadas al avance del frente de humedad en los horizontes inferiores. Esta compleja representación física está definida por la ecuación de Richards (1931), quien combina una ecuación de continuidad con la ley de Darcy, bajo la suposición de que la relación lineal entre la densidad del flujo de masa y el gradiente hidráulico permanece válido para flujos no saturados (Beven, 1991). Sin embargo, el suelo rara vez es homogéneo o isotrópico y las diferencias texturales y de permeabilidad suelen ser sustanciales entre los horizontes superiores e inferiores, lo que provoca un aumento de la incertidumbre sobre los patrones de flujo que se describen en la zona insaturada (Sonu, 1987). La ecuación propuesta por Green and Ampt (1911), retomada por Philip (1957) y posteriormente evaluada por Fok (1975), si bien muestra comparativamente una aparente simplicidad para la predicción de la infiltración, los términos que define están sujetos a errores y, por lo tanto, su aplicabilidad sigue siendo limitada (Fok and Chung, 1987).

Numerosos estudios han tratado de determinar los factores (e.g., luz, agua y nutrientes) que limitan la producción de los bosques maduros en áreas de clima Mediterráneo (Comin et al., 1987; McCarthy y Dawson, 1990; Nambiar, 1990; Gholz et al., 1990; Cartan-Son et al., 1992; Ducrey y Toch, 1992; Sabaté et al., 1992; Ocaña 1997 y Porporato et al., 2001). El agua y los nutrientes han sido considerados tradicionalmente como los factores limitantes del crecimiento de *Quercus ilex* (especie nativa mediterránea de lento crecimiento; Zhang y Romane, 1988 y 1991; Mayor y Rodá, 1992; Mayor et al., 1994). Sin embargo, aún conocemos muy poco sobre cómo usan el agua las encinas y cuáles son los requerimientos mínimos para su crecimiento (Terradas y Savé, 1992). En el caso de reforestaciones

sobre zonas agrícolas semiáridas, la disponibilidad de agua para las plantas forestadas dependerá, no sólo del desarrollo radicular, sino también de la facilidad con que esta penetra en el suelo y de la accesibilidad que la planta tenga sobre ella. Estudios recientes mostraron que el manejo del suelo resulta clave en la supervivencia y desarrollo de ejemplares de encina forestados (Sánchez-Andrés, 2002), principalmente por la eficiencia en la capitalización de los recursos hídricos que ejercen durante los primeros estadios de desarrollo, que puede resultar dependiente de la capacidad que tenga el suelo para modificar el acceso del agua a los horizontes inferiores.

En nuestro caso, la infiltración se presenta como uno de los términos que define la variabilidad del contenido de humedad del suelo y determina la entrada de agua al sistema suelo-planta disponible para el desarrollo vegetativo. La humedad previa del suelo, por sí sola, es capaz de modificar las propiedades físicas del medio y, por lo tanto, de alterar el comportamiento de la infiltración (Fok and Chung, 1987). De este modo, la respuesta de la infiltración está sujeta a una amplia variabilidad definida por las diferentes combinaciones posibles de cada uno de los condicionantes físicos y no físicos del proceso, llegando a generar una elevada incertidumbre en su predicción y posterior relación con la variación de humedad en el suelo. Gran parte de esa dificultad procede de la complejidad para definir la conductividad hidráulica en un medio no saturado. La determinación experimental de este parámetro no resulta fácil. Por esta razón se han realizado numerosos intentos para representarla mediante ecuaciones paramétricas sencillas, en términos de otras propiedades del suelo, más fáciles de determinar (Brutsaert, 2000). Sin embargo, la complejidad y precisión para determinar esos parámetros da como resultado modelos conceptuales que no simplifican en definitiva su operatividad real.

La obtención de datos de campo sobre infiltración ofrece ventajas respecto a la aplicabilidad de esquemas conceptuales o de laboratorio, aunque su interpretación esté abierta a cierta complejidad (Whalley, 1995). Si el objetivo a determinar es el proceso en sí, los datos reflejarán la variabilidad del fenómeno para un área dada, en relación con todos los parámetros que lo controlan, permitiendo, de este modo, la búsqueda de relaciones significativas entre

ellos, en un contexto real. Quizá las técnicas más extendidas para la determinación de tasas de infiltración en campo, por su sencilla aplicabilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos, son el simulador de lluvia y el infiltrómetro de doble anillo, de los que disponemos ejemplos en diferentes lugares y situaciones (e.g. Rahman, 1987; Cerdà, 1995; Angulo-Jaramillo et al., 2000).

El segundo método, más sencillo y operacional, ofrece buenos resultados cuando los objetivos a perseguir son la determinación del comportamiento físico de la infiltración hasta condiciones cuasi-unidimensionales y estacionarias cercanas a la saturación (Zhang, 1997) o la comparación entre diferentes escenarios.

El objetivo de este trabajo ha sido determinar el efecto que el manejo del suelo ejerce sobre el proceso de infiltración en un ensayo experimental de aforestación realizado con *Quercus ilex*, desde la premisa de si una mejor capitalización del agua por las plantas (i.e. mayor crecimiento) viene

condicionada por un incremento de la tasa de entrada de agua al suelo. Para ello hemos definido las curvas de infiltración buscando si la variabilidad observada procede de las condiciones asociadas a cada tratamiento o manejo del suelo en relación con la aforestación o si, por el contrario, depende de las características intrínsecas del propio medio edáfico. Por último, se presentan algunas relaciones que explican la variabilidad del fenómeno de infiltración en función de la variabilidad de la humedad del suelo. La información generada en este estudio es básica para incrementar nuestro entendimiento sobre los efectos que generan, en el ciclo del agua en el suelo, la transformación de los sistemas agrarios a sistemas naturales mediante la intervención antrópica.

Material y métodos

Área de estudio

Los ensayos de campo fueron realizados en la Finca Experimental La Higuera (40°3' N, 4°26'

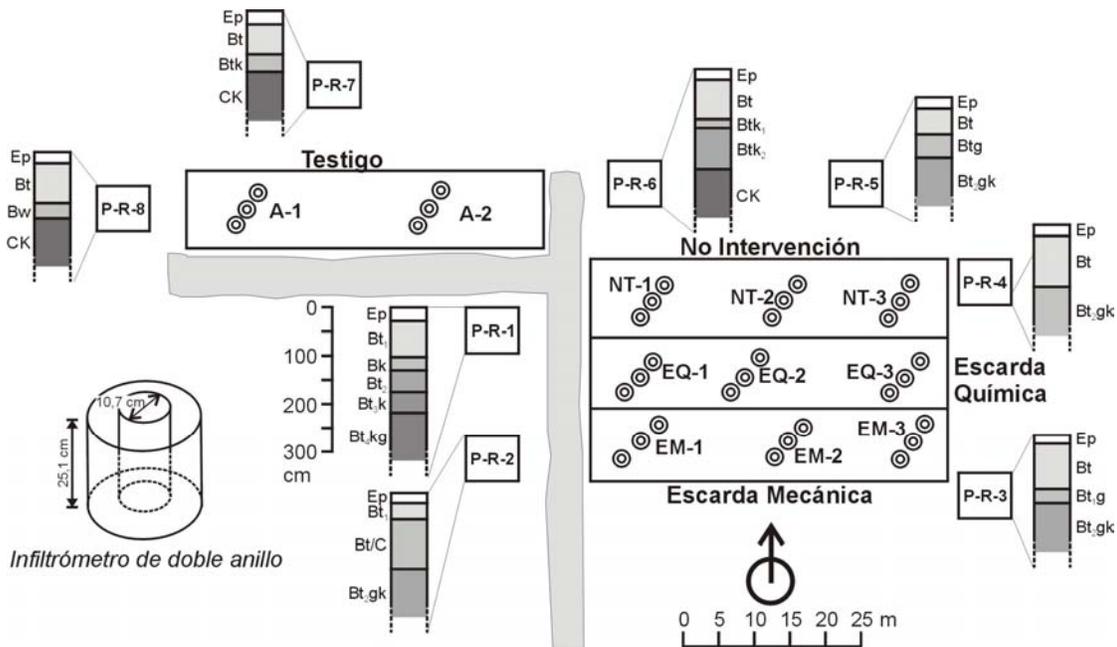


Figura 1. Esquema de situación de los ensayos de infiltración realizados sobre las parcelas experimentales y ubicación de los perfiles del suelo levantados en las lindes. A la izquierda se definen las dimensiones y morfología del infiltrómetro de doble cilindro usado en los ensayos.

Tabla 1. Porcentaje de materia orgánica, arena, limo y arcilla y densidad aparente (g cm^{-3}) en los horizontes superficiales y profundos del suelo del área de estudio. En Resto se han incluido los horizontes situados por debajo de Bt/Bt₁

	<i>Materia orgánica</i>	<i>Arcilla</i>	<i>Limo</i>	<i>Arena</i>	<i>Densidad aparente</i>
Ep	0.37 ±0.07	3.57 ±0.08	19.76 ±0.23	76.67 ±0.27	1.88 ±0.14
Bt/Bt ₁	0.18 ±0.05	8.97 ±0.06	40.61 ±0.30	50.40 ±0.36	1.99 ±0.04
Resto B	0.04 ±0.04	9.02 ±0.16	41.02 ±0.91	49.97 ±0.93	1.99 ±0.13
CK	0.00	5.45 ±2.07	38.39 ±1.25	56.16 ±3.34	1.93 ±0.13
Media	0.15 ±0.15	6.75 ±2.38	30.45 ±9.06	44.63 ±11.35	1.95 ±0.12

W, 450 msnmm) localizada en Toledo, región central de España. Los sistemas agrícolas presentes en el área consisten en cultivos de cereal de temporal (de la Horra, 1992). Los suelos son luvisoles cálcicos (FAO, 1998) con textura arenolimososa. El tipo de clima es Mediterráneo continental (Oliver et al., 1985) con temperaturas medias anuales entre 5° y 25° C. La precipitación media anual durante los últimos 50 años (1950/51-2000/01) fue de 481 mm año⁻¹. Durante el periodo de aforestación y el de los ensayos de infiltración (1994/95-2000/01), las lluvias en promedio anual fueron de 471 mm año⁻¹, repartidas principalmente, entre otoño-invierno y primavera. Las condiciones climáticas y geográficas para realizar una aforestación con encinas están dentro de los límites sugeridos por Meson y Motoya (1993): un promedio de precipitaciones de 350-1600mm año⁻¹, una temperatura media anual de 8-19° C y una altitud de 200-800 msnmm. En el área, el balance de agua en el suelo muestra un déficit de agua de Junio a Septiembre y sólo Enero y Febrero presentan superávit (Oliver et al., 1985). De acuerdo a la clasificación taxonómica de los suelos, el régimen termal y la humedad corresponden a los tipos méxico y xérico (Soil Survey Staff, 1990).

Diseño experimental

La parcela elegida para el estudio experimental fue un área de cultivo de cereal de temporal durante

los últimos 30 años. El área experimental (Fig. 1) abarcó una extensión total de 2400 m², siendo dividida en tres subparcelas de 800 m², una por cada tratamiento del suelo a ensayar: escarda mecánica (EM), escarda química (EQ) y no tratamiento (NT). Junto a ellas, se monitoreó otra subparcela de 800 m² en la cual ni se plantaron encinas ni se le aplicó ningún tratamiento al suelo y que sirvió como control respecto a los diferentes factores ambientales y edáficos del ensayo de aforestación (Sánchez-Andrés, 2002). Después de la última cosecha de cereal, recogida en 1994, y tras una preparación del suelo antes de las lluvias otoñales (i.e. aclareo y labrado superficial), se realizó, en enero de 1995, la siembra y plantación de las encinas. Cada subparcela fue forestada con *Quercus ilex* L. sp. ballota (Desf.) Samp. (Castroviejo et al., 1990) en hoyos de 40 x 20 x 20 cm excavados manualmente para completar 6 columnas y 32 filas, con un marco de plantación de 1.5 x 1.5 m entre los ejemplares (densidad de 2,400 plantas/ha -dentro del rango de 1100 a 2500 recomendado para repoblaciones a gran escala; Mesón y Montoya, 1993). Más información sobre el procedimiento puede consultarse en Sánchez-Andrés (2002). Los tratamientos del suelo se aplicaron anualmente entre Marzo y Abril. El tratamiento mecánico fue aplicado con un motocultor con cultivador entre las filas de las encinas y manual en las proximidades de las

mismas, profundizando hasta 20 cm. Como en los trabajos de Peñuelas et al. (1995) y Carrasco et al. (1997), el tratamiento químico consistió en la aplicación del herbicida de contacto RoundupPro® (Monsanto Agricultural Company) cuyo principio activo es glifosato al 36% de pureza, con una dosis de materia activa de 1 litro cada 100 l ha⁻¹. Para prevenir el contacto de las plantas con el herbicida, estas fueron protegidas durante la aplicación por una toba de 10 cm de diámetro.

Para la obtención de las medidas de infiltración se utilizó un infiltrómetro de doble anillo construido en hierro galvanizado, con las dimensiones especificadas en la Figura 1. El modo de operación fue el recomendado para estas aplicaciones: la base de ambos cilindros se sumergió hasta una profundidad de 10 cm (con el fin de aislar la porción superficial del suelo), se aplicó un volumen de agua en ambos anillos, manteniendo el nivel de agua de manera pareja durante la duración del ensayo para así evitar posibles flujos laterales hacia el cilindro externo (Rahman, 1987). Una vez aplicado el volumen de agua al máximo nivel, se realizaron medidas del descenso en el minuto 1 y 2, para conocer con más exactitud los cambios temporales iniciales, y posteriormente a intervalos de 5 minutos hasta la estabilización del volumen infiltrado. Tras cada anotación se procedió al llenado máximo del nivel en ambos anillos.

Se realizaron un total de 9 ensayos por cada parcela de tratamiento y 6 en la testigo, en la distribución mostrada en la Figura 1, durante el 21 y 22 de Mayo de 2001, todos durante la misma franja horaria (11-15 hrs), para reducir los errores asociados a la variación de la evapotranspiración y a la de la estructura del suelo (Russo et al., 1997). La elección de las zonas siguió criterios de zonalidad asociados a medidas previas de la humedad del suelo cubriendo las áreas superiores, centrales e inferiores de cada tratamiento. Para uniformizar los resultados, evitar disparidades y poder realizar comparaciones posteriores, los datos obtenidos en los ensayos fueron procesados para obtener las curvas de infiltración de cada zona (i. e. EM-1, EM-2, etc.) previa transformación volumétrica en tasa (mm h⁻¹), mediante una función

exponencial modificada del modelo propuesto por Horton (1940): $i \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = i_f + e^{\alpha t + b}$, donde i es la tasa de infiltración instantánea, i_f es la tasa de infiltración final constante en mm h⁻¹, α es el decaimiento exponencial de i , t es el tiempo en minutos y, finalmente, b es una constante de ajuste de la función exponencial.

La humedad del suelo previa al ensayo fue estimada usando reflectometría de dominio de tiempos, TDR (Topp y Davis, 1985), en rangos de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm de profundidad. El modelo de reflectómetro usado fue un Technotronics 1502c Cable Tester.

Las determinaciones granulométricas se realizaron con un analizador de tamaño de partículas Mastersizer-S de banco largo (Malvern Instrument Ltd., 1997) que utiliza una metodología de difracción y dispersión de luz láser, previa dispersión del suelo mediante ultrasonidos y agitación rotatoria. La densidad aparente del suelo se determinó por el método de recubrimiento superficial con parafina (Henin, 1976) con un tamaño de tormos de aproximadamente 5 x 5 cm. La porosidad se determinó a partir de los valores obtenidos en la curva de retención de agua del suelo (pF) con muestras de suelo tamizadas a 2 mm. Para ello se utilizó una membrana de presión de Richards con valores de pF=0 (saturación), pF=2.5 (capacidad de campo) y pF=4.2 (punto de marchitamiento). La porosidad de menor tamaño (microporos <10 µm) se consideró como la suma de la porosidad de drenaje lento (0.2-10 µm) y de la porosidad de retención (<0.2 µm; pF=2 - pF=2.5 y pF=2.5 - pF=4.2, respectivamente); la porosidad de drenaje rápido o macroporosidad (>10 µm), se obtuvo de la diferencia entre los volúmenes de porosidad total a partir de la densidad real y aparente y de la microporosidad (i.e., pF=0 - pF=2). El contenido en materia orgánica se determinó mediante el método de Walkley y Black (1934).

Finalmente, rodeando a las parcelas de experimentación y con el fin de no disturbarlas se levantaron 8 perfiles en los que se efectuó una descripción edafológica siguiendo los criterios taxonómicos de la FAO (1998).

Resultados

Caracterización del suelo

La homogeneidad del terreno, clima y material de partida (arcósico) hacen que la variabilidad espacial esté limitada a los procesos edáficos que ocurren dentro de los horizontes del suelo. En todos los perfiles realizados (Fig. 1) pudo observarse un horizonte superficial (Ep) de entre 19 y 28 cm de espesor con una estructura fuerte, en bloques subangulares, con una alta densidad de raíces finas y con signos de alteración debidos a la historia agrícola del área. Este horizonte limita por debajo, bruscamente y de forma plana u ondulada, con uno laminado (Bt) con espesores de 50-100 cm, en ocasiones con elevada acumulación iluvial (Bt₁). La estructura en ambos es fuerte, de poliédrica a prismática, con cutanes moderadamente gruesos y continuos y con escaso desarrollo de raíces. El límite con los horizontes inferiores es muy variable, de neto a gradual y de irregular a ondulado. Desde aquí, el horizonte B aparece muy diversificado por los movimientos verticales asociados al desplazamiento del agua, con horizontes que muestran acumulaciones iluviales de arcillas, reducciones de hierro, acumulación de carbonatos y acumulaciones residuales o recubrimientos de sesquióxidos. El suelo mineral (CR) aparece al NW de las parcelas de experimentación, a una profundidad entre 126-207 cm.

El contenido en materia orgánica presenta en superficie valores más altos y una distribución espacial más homogénea que en los horizontes subsuperficiales (Tabla 1). Las características granulométricas de los suelos son también muy homogéneas en términos generales. Los horizontes superficiales pertenecen a la clase textural arena de la USDA con un contenido de partículas superiores a 0.05 cm por encima del 75 %, aunque próximos al límite marcado para las arenas limosas o limos gruesos. Del mismo modo, el contenido en limo y arcilla no supera el 20 % y el 5% respectivamente, en ninguno de los horizontes (Tabla 1). Los horizontes inferiores presentan una textura de limo grueso muy marcada con un reparto prácticamente equitativo del porcentaje en limo y arena (Tabla 1). También la densidad aparente del suelo resultó espacialmente muy homogénea, tanto en la horizontal como en la vertical (Tabla 1). Los valores menores se registran en el horizonte superficial y se incrementan ligeramente hacia los horizontes más profundos del suelo. La porosidad responsable de la infiltración, los poros de drenaje rápido (>10 μm), fueron muy importantes en los primeros 20 cm del suelo (promedio= 29.85 ±4.52%) reduciéndose drásticamente con la profundidad (40-100 cm = 8.73 ±2.02%). La no intervención del suelo durante la aforestación incrementó la porosidad de drenaje rápido en la superficie del suelo (34.15 ±3.51%), mientras que el tratamiento mecánico tuvo una tendencia a

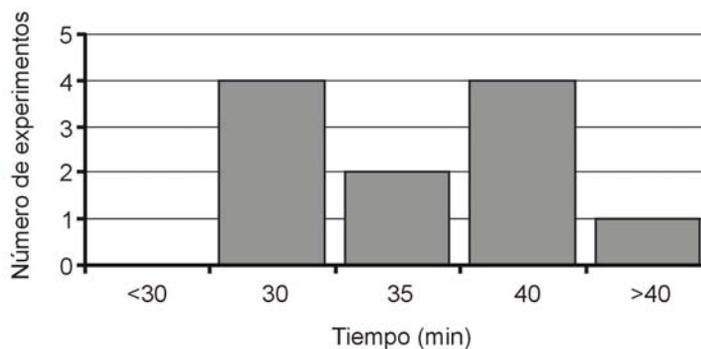


Figura 2. Frecuencia de duración de los ensayos de infiltración, mostrando el tiempo requerido hasta las condiciones de estabilización del volumen infiltrado.

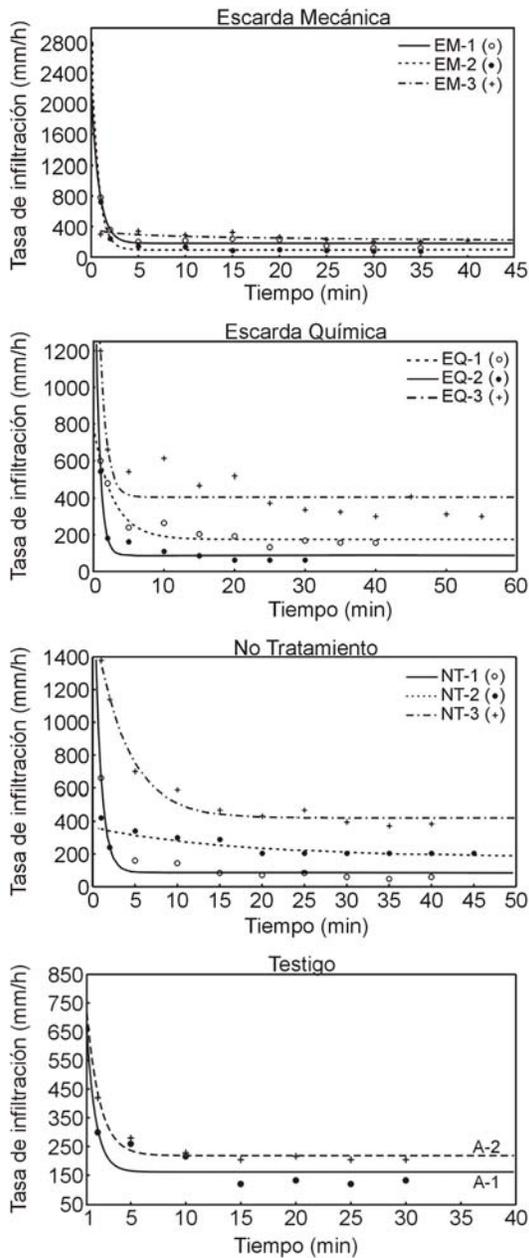


Figura 3. Curvas de infiltración para los diferentes ensayos según el modelo de Horton. El ensayo en EM-3 no permitió convergencia, pero se muestra una curva teórica para aproximar el proceso.

reducirla ($23.95 \pm 1.06\%$). La escarda química registró valores intermedios con similitud a los medidos en la parcela testigo ($30.63 \pm 1.29\%$ y $31.07 \pm 3.06\%$, respectivamente). El tratamiento del suelo durante la aforestación indujo a una homogeneización de la variabilidad espacial en la porosidad, que fue mayor en las parcelas de no tratamiento y testigo.

Características de la vegetación

En el momento de los ensayos, la altura promedio de los ejemplares de *Quercus ilex* en el tratamiento de escarda mecánica fue de 122 ± 40 cm. En el tratamiento de escarda química se registraron alturas promedio inferiores, de entre 78 ± 33 cm. La parcela de no intervención fue la que presentó los ejemplares de menor tamaño con alturas promedio de 44 ± 18 cm. A su vez, los diámetros basales siguieron el mismo patrón, con mayor dimensión para los ejemplares de la escarda mecánica (35 ± 14 mm), seguido de los ejemplares de la escarda química (23 ± 11 mm) y, por último, los de la parcela sin intervención del suelo (9 ± 5 mm).

Durante los ensayos de infiltración, el recubrimiento de herbáceas en las parcelas de escarda química y mecánica osciló entre el 30 y el 45%, mientras que en las parcelas de no intervención y testigo fue del 85 y 90%, respectivamente. Todos los tratamientos presentaron una cubierta vegetal con un tapiz de musgo en las zonas desprovistas de herbáceas, acompañado de una necromasa variable, con distinto grado de descomposición.

Tasas de Infiltración

La duración de los ensayos realizados con el infiltrómetro, hasta la estabilización del volumen de agua infiltrado, nunca fue inferior a 30 minutos y tan sólo una vez superó los 40 minutos (EQ-3 con 55 minutos), lo que advierte de la respuesta temporal del suelo a permitir un flujo constante en situaciones cercanas a la saturación de los niveles superficiales (Fig. 2). En la Figura 3 se muestran las curvas de infiltración descritas en cada uno de los ensayos y tratamientos. El ajuste, en términos generales, fue bastante significativo, a excepción de los ensayos realizados en EM-3 en todas las

Tabla 2. Curvas de infiltración y parámetros más representativos para el modelo de Horton propuesto en cada uno de los ensayos llevados a cabo con infiltrómetro. (i: tasa de infiltración al instante t; if_c : tasa final constante; if_0 : tasa inicial; α : decaimiento exponencial de i; t_c : tiempo hasta if_c).

Ensayo	Modelo Horton	R^2	if_c (mmh ⁻¹)	if_0^* (mmh ⁻¹)	α (min ⁻¹)	t_c (min)
EM-1	$i=180.20+e^{-1.95t+7.59}$	0.95	180.20	779.45	-1.95	4
EM-2	$i=96.61+e^{-1.45t+7.89}$	0.99	96.61	719.47	-1.45	5
EM-3	No se estabilizó	--	--	--	--	>50
EQ-1	$I=174.85+e^{-0.36t+6.41}$	0.95	174.85	600.19	-0.36	19
EQ-2	$I=88.14+e^{-1.56t+7.68}$	0.96	88.14	539.47	-1.56	5
EQ-3	$I=405.39+e^{-1.05t+7.72}$	0.84	405.39	1194.09	-1.05	7
NT-1	$I=87.98+e^{-1.28t+7.63}$	0.96	87.98	658.65	-1.28	6
NT-2	$I=181.13+e^{-0.06t+5.21}$	0.65	181.13	352.66	-0.06	>50
NT-3	$I=420.34+e^{-0.26t+7.11}$	0.99	420.34	1364.52	-0.26	30
A-1	$i=161.30+e^{-1.20t+7.41}$	0.93	161.30	657.54	-1.20	10
A-2	$i=217.93+e^{-0.83t+7.04}$	0.99	217.93	719.84	-0.83	7

*Tasa de infiltración después del primer minuto.

repeticiones, donde no fue posible encontrar convergencia dada la fuerte variabilidad registrada (Tabla 2). La forma de las curvas, representadas por el valor de α , muestra una importante variabilidad intra e intertratamientos, lo que denota la variable respuesta del sistema ante la infiltración (Fig. 3, Tabla 2). Las tasas de infiltración más elevadas, tanto final constante (if_c) como al primer minuto (if_0), se registraron siempre en el punto 3 de cada tratamiento, mostrando una clara zonalidad dentro de cada parcela, que puede llegar a ser comparable en todo el conjunto y responder a criterios ajenos al manejo del suelo (Fig. 3, Tabla 2). El rango de valores de if_c fue de 88-420 mm h⁻¹, significativo tratándose de una extensión de terreno reducida. En el caso de if_0 , la diferencia entre máximo y mínimo fue ligeramente inferior proporcionalmente (353-1365 mm h⁻¹). Así, la tasa media de infiltración constante para todos los ensayos se situó en 201.4 ± 120.0 mm h⁻¹ y en 758.6 ± 301.5 mm h⁻¹ para el caso de if_0 . El tiempo de respuesta o estabilización del suelo hasta tasas de infiltración constantes (t_c) varía de 4 a más de 50 minutos, en relación con el valor de α . En los

ensayos realizados en el tratamiento de escarda mecánica aparecieron los valores promedio más bajos de t_c , excluyendo el punto EM-3, mientras los mayores lo hicieron en el no tratamiento. Por término medio, el tiempo de estabilización se situó para todos los ensayos en 13,0 minutos (desviación standard ± 11.8 minutos).

Los valores de if_c se ajustaron a una distribución log-normal (D de Kolmogorov-Smirnov $p \geq 0.10$). A pesar de ello, pudo observarse que la distribución de frecuencias de los valores de if_c observados en los ensayos y los predichos por las ecuaciones varían sensiblemente (Fig. 4a). Mientras que estos últimos presentan una frecuencia de distribución dominada por valores bajos, entre 50 y 100 mm h⁻¹, con la cola de distribución hacia valores altos, en aquellos esta pauta desaparece y aparece un pico en valores de if_c mayores (Figura 4a). Para las frecuencias de if_0 (al minuto de inicio del proceso), la distribución es muy similar en ambos casos con los máximos valores registrados entre 600 y 800 mm h⁻¹ e incluso casi idéntica (F-test, $p=0.96$; test de Kolmogorv Smirnov $p=0.99$) respecto a la

Tabla 3. Regresiones múltiples por pasos entre las tasas de infiltración (if_0^* e if_c) y los valores de humedad y porosidad de rápido drenaje a diferentes profundidades. ($h_{0-15-30}$ volumen de humedad (%) a las profundidades 0-15 cm y 15-30 cm; $p_{0-20-40}$ volumen (%) de poros de rápido drenaje a las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm).

	<i>Paso</i>	R^2	R^2	<i>F -entrada/salida</i>	<i>p-level</i>
<i>if₀</i>					
h_{15-30}	1	0.54	0.54	9.48	0.02
p_{40-60}	2	0.72	0.18	4.59	0.07 ^{ns}
<i>if_c</i>					
h_{15-30}	1	0.44	0.44	6.29	0.05
p_{0-20}	2	0.57	0.13	2.15	0.20 ^{ns}
p_{40-60}	3	0.73	0.16	3.52	0.12 ^{ns}
h_{0-15}	4	0.84	0.11	3.29	0.13 ^{ns}
<i>if_c</i>					
if_0	1	0.72	0.72	20.97	0.004
p_{0-20}	2	0.80	0.07	2.50	0.17 ^{ns}
h_{30-45}	3	0.86	0.06	2.75	0.15 ^{ns}

* tasa al minuto 1.

^{ns} no significativo para $p > 0.05$.

variabilidad (Figs. 4a y 4b). Por el contrario, a pesar de que la amplitud de la variación de if_c es similar en los modelos que la registrada en los ensayos de campo, pueden observarse diferencias considerables entre los datos observados y los predichos, en término medio sobreestimados (Fig. 4b).

La comparación entre las curvas de infiltración de los diferentes tratamientos resulta compleja en virtud de la variabilidad anteriormente presentada. Los valores medios más bajos para if_c e if_0 se registraron en el tratamiento de escarda mecánica y en la parcela testigo, respectivamente, datos que van acompañados de una menor variabilidad intra-tratamiento (Fig. 5). Por el contrario, en la parcela de no tratamiento y en la de escarda química se registraron los valores medios más elevados, pero con el apunte de una amplísima variabilidad que en ocasiones lleva a dar los valores más bajos para ambos parámetros if_c e if_0 (Fig. 5).

Según el modelo de Horton, el valor de la tasa de infiltración inicial condiciona la estacionaria, en el sentido de que a esta última se llega a partir de la ruptura de las condiciones físicas iniciales. Esta relación fue significativa ($p < 0.05$), con una varianza explicada del 60%, pero sin una linealidad gráfica clara (Fig. 6). En este sentido, el valor bajo de varianza puede reflejar la influencia directa de otros parámetros sobre if_0 e indirecta sobre if_c . Es decir, puesto que la influencia de if_0 sobre if_c debe ser indirecta y pasa por el control que ejercen las condiciones de humedad existentes antes de realizar el ensayo, es necesario ubicar esas relaciones directas e indirectas para entender el fenómeno de la infiltración y su variabilidad en relación con los usos del suelo. Los valores de la humedad del suelo registrados previamente a los ensayos de infiltración se observan en la Figura 7. En este caso, dada la importancia que el proceso de transporte de flujo tiene en la componente vertical al utilizar un infiltómetro, las tres profundidades a

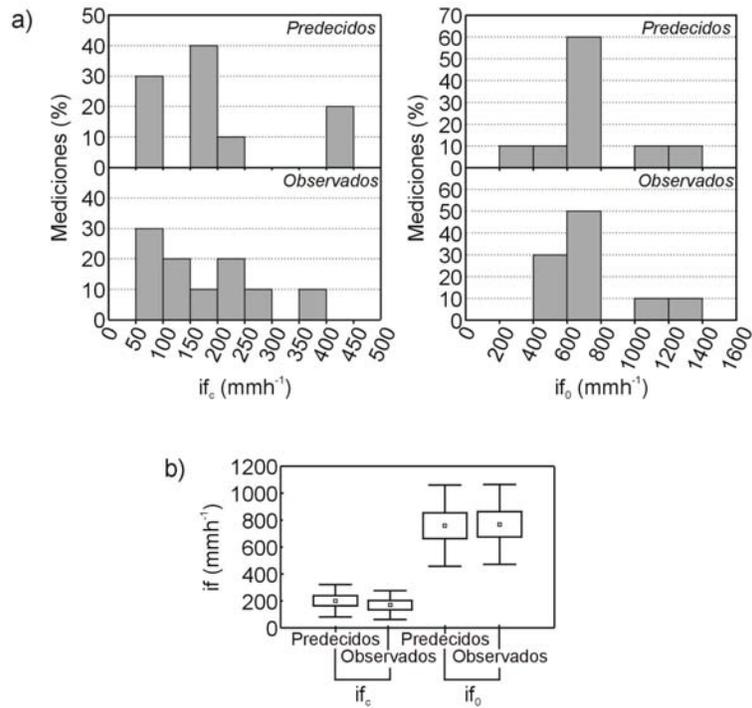


Figura 4. Condiciones de la calibración del modelo de Horton para las diferentes curvas de infiltración y sus valores de las tasas de infiltración inicial (if_0) y final constante (if_c). a) Comparación de la distribución de los valores de if_0 e if_c observados y predecidos. b) Comparación de la variabilidad de if_0 e if_c registrada en los datos reales y en las curvas de Horton (la línea indica la desviación standard y los rectángulos el error standard).

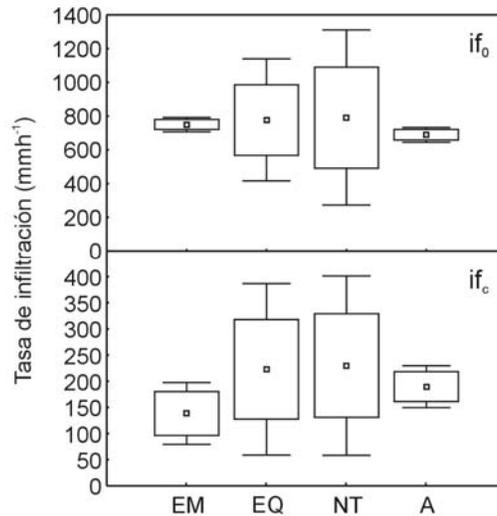


Figura 5. Gráfico Box & Wisher para comparar los valores de las tasas de infiltración inicial (if_0) y final constante (if_c) en cada uno de los tratamientos. La línea indica la desviación standard y los rectángulos el error standard.

Tabla 4. Regresiones lineales por piezas con puntos de ruptura para la estimación de if_0 e if_c (ambas en $mm\ h^{-1}$) a partir de datos de humedad (h, en % en volumen) y porosidad de rápido drenaje (p, en % en volumen). (a y b: ecuaciones por debajo y por encima del punto de ruptura, respectivamente)

	Punto ruptura	R^2
a) $if_0 = 984.85 - 498.03 h_{0-15} - 803.05 h_{15-30} - 459.35 h_{30-45}$	758.59	95
b) $if_0 = 1584.79 + 1248.00 h_{0-15} - 5022.77 h_{15-30} + 54.16 h_{30-45}$		
a) $if_0 = 1066.82 + 264.32 h_{0-15} + 523.39 h_{15-30} - 601.40 h_{30-45} - 33.01 p_{0-20} + 67.19 p_{20-40}$	758.59	99
b) $if_0 = 375.27 + 28.43 h_{0-15} + 83.99 h_{15-30} + 285.77 h_{30-45} + 43.19 p_{0-20} - 85.21 p_{20-40}$		
a) $if_c = 173.87 - 0.06 if_0$	201.39	90
b) $if_c = -14.35 + 0.33 if_0$		
a) $if_c = 38.52 + 127.16 h_{0-15} + 1.19 h_{15-30} + 243.64 h_{30-45}$	201.39	94
b) $if_c = 38.52 + 127.16 h_{0-15} + 1.19 h_{15-30} + 243.64 h_{30-45}$		
a) $if_c = 462.68 - 0.20 if_0 + 1530.32 h_{0-15} + 578.15 h_{15-30} + 731.58 h_{30-45} - 26.24 p_{0-20} - 2.87 p_{20-40}$	201.39	100
b) $if_c = 175.41 + 0.16 if_0 + 15.17 h_{0-15} + 38.36 h_{15-30} + 124.35 h_{30-45} + 5.89 p_{0-20} - 26.50 p_{20-40}$		

las que se registró la profundidad se tomaron como control de cara a observar los efectos que ejercen sobre el comportamiento de la infiltración. Los datos de humedad reflejan las condiciones hidrológicas existentes en el momento de los ensayos, con valores bajos inferiores al 30 %, sin embargo, superiores a los registrados durante el verano. La utilización de la humedad a tres profundidades nos permite observar la variabilidad del suelo a modo de rebanada. De este modo, es posible observar un gradiente positivo normal de humedad hacia zonas inferiores en las zonas 1 y 2 de cada ensayo, incluyendo la parcela testigo, que, sin embargo, se invierte en el punto 3 del no tratamiento o, incluso, muestra una anomalía, con reducciones del contenido de humedad en el nivel intermedio (15-30 cm) en los otros puntos 3 (Fig. 7). Este aspecto, si bien no puede explicarse estadísticamente, gráficamente muestra que donde se registra esa aparente anomalía es donde también se dieron los valores de if_c más altos (EM-3 –en campo–, EQ-3 y NT-3), asociados a niveles de humedad inferiores en superficie (Fig. 7, Tabla 2).

La relación entre los contenidos volumétricos de humedad y los tiempos de estabilización (t_c) no mostró patrones claros y tampoco presentó significación estadística ($p > 0.01$). Por ejemplo, se pudo observar que en las zonas donde se presenta la anomalía intermedia de humedad pueden aparecer tanto valores de t_c muy altos como muy bajos (Tabla 2, Fig. 7); es decir, la extrema

variabilidad no permite deducir ninguna pauta a este respecto.

El contenido de humedad existente a diferente profundidad puede definir el valor de if_0 y, por lo tanto, de if_c . Así, parece que el control de la infiltración lo ejerce el contenido medio de humedad existente en la profundidad de 15-30 cm ($p < 0.01$), con relaciones exponenciales como muestra la Figura 8. En el resto de niveles no apareció significación estadística ($p > 0.05$). De esta forma, un elevado porcentaje de la varianza (82%) de if_0 está explicado por el contenido inicial de humedad a la mencionada profundidad. Indirectamente, ese control determina los valores finales de la tasa de infiltración constante. Por el contrario, las relaciones entre tasas de infiltración y porcentaje en volumen de poros de rápido drenaje, que supuestamente deben controlar el proceso, no se mostró significativa ($p > 0.1$). Para encontrar la partición real de la influencia de las variables de humedad y porosidad en las tasas de infiltración se llevaron a cabo regresiones múltiples por pasos. Los resultados mostraron la escasa significación de las relaciones cuando en ellas entraba otra variable diferente a la humedad del nivel 15-30 cm (Tabla 3). En el caso de if_c , a pesar de la relación aparente con el nivel de humedad 15-30 cm (Fig. 8), se pudo comprobar que ésta es indirecta y depende exclusivamente del control que el contenido de humedad inicial a esa profundidad ejerce sobre if_0 , reafirmando la dependencia de los valores de la

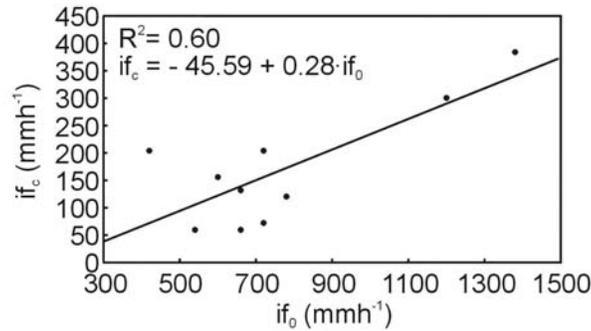


Figura 6. Relación entre tasa de infiltración final constante (if_c) e inicial (if_0). Datos de todos los ensayos. Significativo estadísticamente para $p < 0.05$.

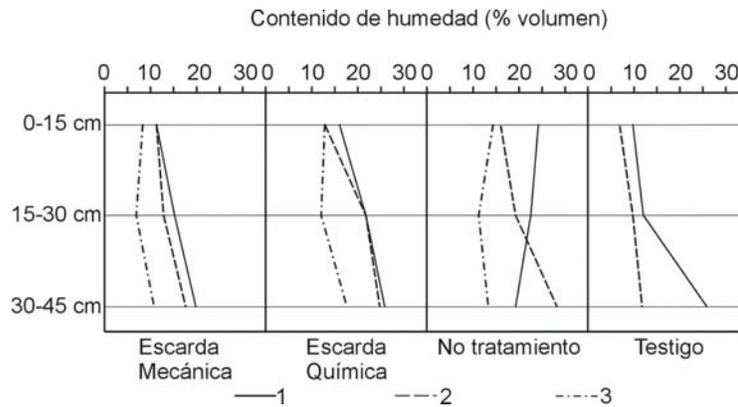


Figura 7. Variación del contenido de humedad antes de los ensayos en los diferentes tratamientos según los valores medios para los tramos 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm.

tasa final constante con los de la tasa inicial (Tabla 3). Finalmente, el modelo que permite una predicción más significativa de los valores de if_0 e if_c parece ser el representado por regresiones lineales por piezas con puntos de ruptura. Según las funciones representadas, la varianza de if_c explicada por if_0 llega hasta valores del 90%; incluyendo únicamente los datos de humedad a los diferentes niveles llega hasta el 94% y al introducir todas las variables se completa hasta el 100% (Tabla 4). La estimación de if_0 a partir de los datos de humedad también refleja un buen ajuste con un R^2 de 95%, llegando hasta el 99% cuando se incluyen valores de porosidad de rápido drenaje (Tabla 4). El punto de ruptura se mantiene

invariable a lo largo de las funciones indicando un límite de comportamiento del suelo a partir de esas tasas de infiltración inicial y constante (Tabla 4).

Discusión

Son escasos los trabajos que denoten situaciones similares a las que nosotros presentamos en este estudio y más, si cabe, referente a la infiltración. La complejidad técnica y, sobre todo, la dificultad interpretativa de los resultados desestiman la proliferación de investigaciones de campo sobre infiltración (Angulo-Jaramillo et al., 2000). No existen trabajos con la temática de aforestación aquí propuesta

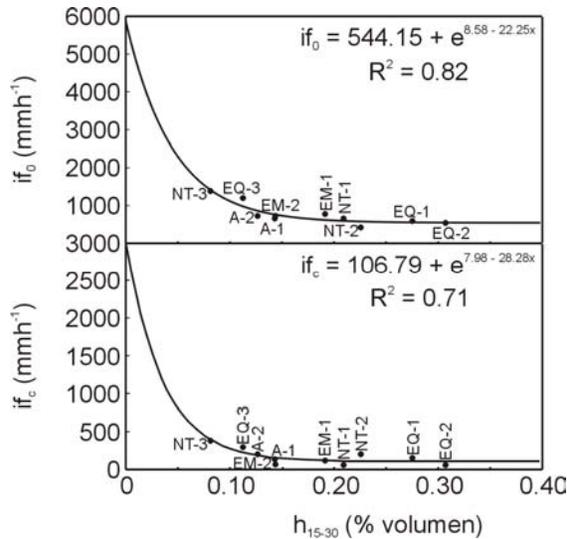


Figura 8. Relaciones entre las tasas de infiltración inicial (if_0) y final constante (if_c) y el contenido medio de humedad a la profundidad de 15-30 cm. Ambas son significativas estadísticamente para $p < 0.05$.

relacionada con la comparación de la infiltración según diferentes tratamientos a los que podría someterse un suelo. Únicamente podría acercarse el estudio de Mapa (1995), que aunque desarrollado sobre suelos tropicales en Sri Lanka, observa los efectos que la aforestación con teca (*Tectona grandis*) genera en la infiltración, pero con ausencia del sentido tratamiento que enfocamos en este estudio. Tampoco son abundantes los trabajos de infiltración sobre suelos mediterráneos o en áreas de clima semiárido. Las curvas de ajuste obtenidas, sin embargo, no muestran diferencias significativas respecto al parámetro α con otros estudios sobre infiltración, así como tampoco es remarcable la variabilidad observada (e.g. Rahman, 1987; Witthawatchutikul and Rouysungnern, 1987; Cerdà, 1995). Las tasas de infiltración if_0 e if_c registradas en nuestros ensayos están dentro de los rangos citados por otros autores (Rahman, 1987; Cerdà, 1995; Mertens et al., 2002), si bien es cierto que la variabilidad registrada es tan amplia y diversa que resulta compleja una comparación fuera del contexto de cada estudio. Ocurre lo

mismo con las frecuencias de distribución log-normal para los valores de if_c , admitida globalmente en otros estudios (Cerdà, 1995; Zavattaro et al. 1999; Jacques, 2000; Mertens et al., 2002), lo que confirma la suficiencia de nuestros ensayos. Los tiempos de estabilización (t_c) registrados en nuestras pruebas son tan variables como los que muestra Cerdà (1995) para los suelos mediterráneos arcillosos de la franja levantina. Este término, dependiente de α , podría considerarse excluyente en la comparación entre tratamientos puesto que define las características del proceso de infiltración, reuniendo todos los condicionantes texturales y estructurales del suelo que controlan la entrada y el flujo saturado de agua (estratificación, costras superficiales, macroporosidad, materia orgánica, histéresis, humedad inicial). Así, los menores tiempos de estabilización registrados en la escarda mecánica y química reflejan una respuesta y ajuste más rápido del suelo al avance del frente de humedad, posiblemente condicionado por el tratamiento al que se someten. Sin embargo, la forma de respuesta no resulta tan excluyente. Tiempos de respuesta altos no implican, por lo general, tasas de infiltración altas o viceversa, lo que excluiría a la humedad inicial como principal condicionante, dejando mayor peso al contenido de aire atrapado durante el proceso de infiltración (Reynolds et al., 1983; Elrick et al., 1989; Mertens et al., 2002).

A pesar de ello, sí se observan diferencias entre los diferentes tratamientos respecto a las tasas de infiltración inicial y constante, lo que podría denotar de nuevo la condición del manejo en la entrada de agua al sistema. Escarda mecánica presenta los valores medios más bajos para if_c , mientras que el testigo lo hace en if_0 . Es decir, el tratamiento mecánico debería permitir una mayor entrada de agua, pero al incrementar el intercambio con la atmósfera y, por lo tanto, la evapotranspiración, su respuesta es desde niveles de humedad más bajos, lo que podría condicionar, junto al aire atrapado, un movimiento menos eficiente del frente de humedad en la vertical. Además, aunque la aplicación de este tratamiento provoca la incorporación de materia orgánica en niveles subsuperficiales, que debería generar un aumento de la tasa de infiltración (Cerdà, 1995),

también genera la aparición de macroporosidad vertical y lateral, que da lugar a reducciones de la tasa, en el sentido de que los macroporos son muy importantes en la ruta del agua pero no en el volumen de flujo (Heppel et al., 2000). El efecto del tratamiento mecánico es a uniformizar la respuesta hidrológica del suelo, como lo demuestra la reducida variabilidad en las tasas de infiltración registradas, sobre todo en la inicial, que posiblemente responda a un aumento de la homogeneidad superficial (Novák, 1999). Esta uniformidad puede dar lugar a un acceso más rápido y eficiente del agua al horizonte argílico, donde el hinchamiento de las arcillas limitaría significativamente el paso del flujo a niveles inferiores, con la reducción de la tasa de infiltración final constante (Favre et al., 1997). A pesar del porte arbóreo de las encinas en este tratamiento, esta última hipótesis resultaría más evidente que el posible efecto que la transpiración arbórea pueda ejercer como limitante de la tasa de infiltración neta en zonas semiáridas, observado por Stothoff et al. (1999).

Las tasas de infiltración inicial observadas en la parcela testigo (es decir, abandono), en la que se esperan las mayores tasas de escorrentía, son similares a la media citada en los ensayos que Cerdà (1995) realizó sobre suelos margosos y arcillosos abandonados. Esto, teniendo en cuenta las diferencias con los suelos escogidos por Cerdà, confirma que la reducción de la tasa de infiltración y el consecuente aumento de escorrentía en zonas abandonadas depende más de la degradación del suelo, en relación con la existencia o no de vegetación, que de la tipología litológica, por lo que una re-vegetación puede generar una recuperación de la infiltración (Mapa, 1995), algo comprobado en nuestros ensayos. Este comportamiento inicial de la parcela testigo puede denotar la influencia de una costra superficial, de rápido desarrollo, en suelos abandonados no vegetados (Fox et al., 1998), que reduce la tasa de infiltración inicial. Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto por Fox et al. (1997), Fox et al. (1998) y Novák (1999), resulta raro que la costra superficial se desarrolle con tanta uniformidad a lo largo de toda la extensión en un área abandonada y con ligera pendiente, teniendo en cuenta la escasa

variabilidad espacial observada en i_{f_0} . La respuesta posterior del suelo no cambia bruscamente, por lo que es de esperar que la costra siga ejerciendo resistencia durante un tiempo relativamente elevado (Fox et al., 1998).

Los datos que aporta la parcela reforestada de no tratamiento (altas tasas de infiltración) corroboran las observaciones de Mapa (1995), quien en su estudio sobre zonas reforestadas sin ningún tratamiento del suelo observa grandes diferencias en cuanto a la tasa final constante, comparadas con áreas abandonadas. De acuerdo con Mapa (1995) los resultados se deben principalmente a la mejora de la estructura, aumento de la macroporosidad por la actividad de las raíces y del contenido en materia orgánica.

El proceso de infiltración está claramente condicionado por el contenido de humedad previo existente en el suelo (Richards, 1931). Sin embargo, el mecanismo de control aún permanece poco claro. En nuestro caso, la relación entre i_c e i_{f_0} está condicionada por el efecto que la humedad inicial ejerce en esta última, aunque indirectamente es posible obtener información de la tasa constante a partir de los valores de humedad. Las medidas de humedad a diferentes niveles nos muestran que, a pesar de que el infiltrómetro lleva a cabo un confinamiento superficial, la tasa de infiltración está condicionada de manera más significativa por el contenido de humedad existente entre los 15 y los 30 cm de profundidad. Este aspecto, observado también en zonas agrícolas (El-Kadi, 1987), marca la importancia de los gradientes de humedad del suelo en el control de la respuesta inmediata del sistema y, por lo tanto, del avance del frente de humedad. La alteración del contenido de agua registrada en los niveles intermedios (15-30 cm) en el margen Oeste de las parcelas, ha dado lugar a tasas de infiltración mucho más altas comparativamente, independiente del tratamiento. Así, es posible pensar que ciertas características intrínsecas que dan lugar a fenómenos físicos subsuperficiales –en nuestro caso la humedad–, pueden ejercer un control muy importante sobre cómo y cuánta agua accede desde la superficie, independientemente del manejo que pueda efectuarse. Por último, la respuesta a gradientes negativos, como el que refleja el área de muestreo

NT-1, resulta poco clara respecto a la tasa inicial y a la rápida estabilización, pero puede resultar lógica en la tasa final constante obtenida. Sin embargo, es posible que la estabilización de la infiltración sea aparente, y responda más a flujos laterales que verticales (Rahman, 1987), aunque puede responder al criterio de reducción de la tasa de flujo con el aumento de la profundidad (Buttle and House, 1997) y a un mayor entrapamiento de aire en los niveles inferiores. A pesar del aparente peso de los gradientes de humedad, no hemos podido establecer una relación significativa con las tasas de infiltración, posiblemente debido a que, como menciona Mertens et al. (2002), la contribución relativa de gravedad y capilaridad al movimiento del agua en un medio no saturado da lugar a una incertidumbre muy elevada.

La falta de significación entre tasas de infiltración y porosidad viene a demostrar la escasa importancia de los macroporos en cuanto al volumen de agua infiltrado (Buttle and House, 1997; Heppel et al. 2000). Sin embargo, al no poder realizar un seguimiento del frente de humedad por las condiciones del ensayo de aforestación, no pudimos comprobar su importancia respecto al control de la ruta del agua en profundidad.

Las posibilidades de modelación de la tasa de infiltración a partir de la calibración con datos de campo siguen resultando complejas fuera de un contexto empírico. Aún no se han resuelto todos los detalles pertinentes para proponer un modelo conceptual ajustado que incluya, al menos, todas las variables más significativas del proceso, desde los condicionantes de la infiltración-escorrentía durante un evento lluvioso hasta los que determinan los flujos migratorios posteriores (e.g., Corradini et al., 2000). Las aproximaciones estocásticas, que siguen ocupando sectores aislados del proceso, si bien pueden ayudarnos a entender y despejar ciertos fenómenos complejos, están aún lejos de resolver el difícil entramado de variables que competen el fenómeno de infiltración y los cambios de humedad consecuentes (Laio et al., 2001a; Laio et al., 2001b y Porporato et al., 2001). Los modelos lineales por piezas, a pesar de no representar fielmente procesos que son mayormente potenciales o exponenciales, pretenden simplificar

la complejidad y obtienen buenas predicciones de las variables. El comportamiento bifásico del flujo de infiltración ya fue caracterizado en algunos trabajos, aunque con particiones de relaciones no lineales (El-Kadi, 1987). En nuestro caso, la respuesta del sistema se rompe claramente en un valor de las tasas i_f e i_c , que permanecen siempre constantes en todas las combinaciones, lo que muestra el comportamiento diferencial del suelo por encima y por debajo de esos valores. En ambas tasas, el valor de ruptura únicamente es superado en las situaciones de anomalía del gradiente de humedad del suelo, por lo que la normalidad reduce la utilización a únicamente la primera ecuación.

Podemos concluir que la aforestación de las áreas agrícolas abandonadas es una medida efectiva a corto plazo para reducir la escorrentía y evitar la pérdida de suelo por erosión. Además, las tasas de infiltración se incrementan si al suelo se le aplica un manejo químico o mecánico, que se traduce también en un mayor crecimiento arbóreo. El tratamiento mecánico, que presentó los niveles más altos de supervivencia y crecimiento en la aforestación con *Quercus ilex*, no es el más exitoso por un incremento de la tasa de infiltración, como resultado de la creación de macroporos y grietas, sino por incrementar el contenido de humedad del suelo y ampliar el rango de agua útil que facilita el acceso por las plantas que la economizan de una manera más eficiente.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Servicio de Investigación Agraria de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (España) por financiar este estudio, dentro del proyecto de investigación N131/RN-20 "Estudio de alternativas a los cambios de uso del suelo para el desarrollo sostenible en áreas de agricultura tradicional". Gracias también al Laboratorio de Física del Suelo del Centro de Ciencias Medioambientales, en especial a Margarita Pérez Peñasco, por su colaboración.

Bibliografía

Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L., Gaudet, J.P., and Vauclin, M., 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties disc and

- ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil Tillage Research*, 55: 1-29.
- Beliaev, A.Y., and Hassanizadeh, S.M., 2001. A theoretical model of hysteresis and dynamic effects in the capillary relation for two-phase flow in porous media. *Transport in Porous Media*, 43: 487-510.
- Beven, K., 1991. Infiltration, soil moisture and unsaturated flow. En: D.S. Bowles y P.E. O'Connell (eds.), *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*. Kluwer Academic Publishers NATO ASI Series. Dordrecht, Holanda, pp 137-150.
- Brutsaert, W., 2000. A concise parameterization of the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Advances in Water Resources*, 23: 811-815.
- Buttle, J.M. and House, D.A., 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *Journal of Hydrology*, 203: 127-142.
- Carrasco, I., Ocaña, L., Peñuelas, J. and Domínguez, S., 1997. Ensayo de tratamientos herbicidas en cultivos de tres especies forestales (*Pinus halepensis*, *Pinus nigra* y *Quercus flex*) en vivero. *Actas del II Congreso Forestal Español*. Vol. III. 111-116.
- Cartan-Son, M., Floret, C., Galan, M.J., Grandjanny, M., Le Floch, E., Maistre, M., Perret, P. and Romane, F., 1992. Factors affecting radial growth of *Quercus flex* L. in a coppice stand in southern France. *Vegetatio*, 99-100, 61-68.
- Castroviejo, S., Lainz, M., López, G., Monserrat, P., Muñoz, F., Paire, J. and Villar, L., 1990. *Flora Ibérica. Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares*. Vol. II. Real Jardín Botánico del CSIC, Madrid, España.
- Comin, M.P., Escarré, A., Gracia, C.A., Lledó, M.J., Rabella, R., Savé, R. and Terradas, J., 1987. Water use by *Quercus flex* in forests near Barcelona, Spain. En: Tenhunen, J.D., Catarino, F. M., Lange, O.L., and Oechel, W. C. (Eds). *Plant response to stress : Functional analysis in Mediterranean ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin. Ser. G. Ecol. Sci., Vol. 15.
- Cerdà, A., 1995. Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos. *Geofoma Ediciones*. Logroño.
- Corradini, C., Melone, F. and Smith, R.E., 2000. Modeling local infiltration for a two-layered soil under complex rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 237: 58-73.
- Ducrey, M. and Toch, J., 1992. Effect of cleaning and thinning on height growth and girth increment in holm oak coppices (*Quercus flex* L.). *Vegetatio*, 99-100, 365-376.
- Eldridge, D.J., Zaady, E. and Shachak, M., 2000. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscape in the Negev, Israel. *Catena*, 40: 323-336.
- El-Kady, M.M., 1987. Infiltration studies in Egypt. En: Y-S. Fok (ed.), *Infiltration: principles and practices*. International Conference on Infiltration Development and Application, Post-Conference Proceedings. Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. Honolulu, Estados Unidos. pp. 443-454.
- Ehrick, D.E., Reynolds, W.D. and Tan, K.A., 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monitoring Review*, 9: 184-193.
- FAO, 1998. World reference base for soil resources. World Resources Report 84. FAO, Roma.
- Favre, F., Boivin, P. and Wopereis, M.C.S., 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma*, 78: 113-123.
- Fok, Y-S., 1975. A comparison of the Green-Ampt and Philip two-term infiltration equations. *Transactions of the American Society Agricultural Engineering*, 18: 1073-1076.
- Gholz, H.L., Ewel, K.C. and Teskey, R.O., 1990. Water and Forest Productivity. *Forest Ecology and Management*, 30: 1-18.
- Green, W.H. and Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4: 1-24.
- Fok, Y-S. and Chung S-O., 1987. Infiltration development and application needs. En: Y-S. Fok (ed.), *Infiltration: principles and practices*. International Conference on Infiltration Development and Application, Post-Conference Proceedings. Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. Honolulu, Estados Unidos. pp. 5-15.
- Fox, D.M., Bryan, R.B. and Price, A.G., 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80: 181-194.
- Fox, D.M., Le Bissonnais, Y. and Quéting, P., 1998. The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography. *Catena*, 32: 101-114.
- Henin, S. 1976. *Cours de physique du sol*. In: Orstam (Eds). Paris/Bruselas. Vol. I, 158 pp.
- Heppell, C.M., Burt, T.P. and Williams, R.J., 2000. Variations in the hydrology of an underdrained clay hillslope. *Journal of Hydrology*, 227: 236-256.
- Horton, R.E., 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society American Proceedings*, 36: 399-417.
- Jacques, D., 2000. Analysis of water flow and solute transport at the field scale. Tesis Doctoral nº 454. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, K.U. Leuven, Bélgica.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L. and Rodríguez-Iturbe, I., 2001a. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress, II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, 24: 707-723.
- Laio, F., Porporato, A., Fernández-Illescas, C.P. and Rodríguez-Iturbe, I., 2001b. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress, IV. Discussion of real cases. *Advances in Water Resources*, 24: 745-762.
- Malvern Instrument Ltd., 1997. *Getting started MasterSizer-S*. Worcestershire. Reino Unido.
- Mapa, R.B., 1995. Effect of reforestation using *Tectona grandis* on infiltration and soil water retention. *Forest Ecology and Management*, 77: 119-125.
- Mayor, X. and Rodá, F., 1992. Is primary production in holm oak forest nutrient limited?. A correlational approach. *Vegetatio*, 99-100: 209-218.
- Mayor, X., Belmonte, R., Rodrigo, A., Rodá, F. and Piñol, J., 1994. Crecimiento diametral de la encina (*Quercus flex* L.) en un año de abundante precipitación estival: efecto de la

- irrigación previa y de la fertilización. *Orsis*, 9: 13-23.
- McCarthy, J.J. and Dawson, J.O., 1990. Growth and water use efficiency of *Quercus alba*, *Q. bicolor*, *Q. imbricaria* and *Q. pallustris* seedlings under conditions of reduced soil water availability and solar irradiance. *Trans. III. State Acad. Sci.* 83, 128-148.
- Mertens, J., Jacques, D., Vanderborght, J. and Feyen, J., 2002. Characterization of the field-saturated hydraulic conductivity on a hillslope: in situ single ring pressure infiltrometer measurements. *Journal of Hydrology*, 263: 217-229.
- Mesón M.L. and Montoya J.M., 1993. *Selvicultura Mediterránea*. Mundi-Prensa, Madrid.
- Nambiar, E.K.S., 1990. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. *Forest Ecology and Management*, 30: 213-232.
- Novák, V., 1999. Soil-crack characteristics – estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99: 501-507.
- Ocaña, L., Domínguez, S., Carrasco, I., Peñuelas, J. and Herrero, N., 1997. Influencia del tamaño de la semilla y diferentes dosis de fertilización sobre el crecimiento y supervivencia en campo de cuatro especies forestales. *Actas del II Congreso Forestal Español*. Vol III: 461-466.
- Oliver, S., González, R. and Lacasta, C., 1985. Caracterización climática de la Finca experimental ALa Higuera. En: Blanco de Pablos (Ed.), *Avances sobre la investigación en Bioclimatología*. CSIC. Madrid, España. pp. 87-95.
- Peñuelas J.L., Ocaña L., Domínguez S. and Renilla I. 1995. Primeros ensayos sobre el control de la competencia herbácea en repoblaciones de terrenos agrícolas abandonados. *Actas Congreso. Sociedad. Española Malherbología*. Madrid, 229-232.
- Philip, J.R., 1957. The theory of infiltration. 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 77: 153-157.
- Porporato, A., Laio, F., Ridolfi, L. and Rodríguez-Iturbe, I., 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress, III. *Vegetation water stress. Advances in Water Resources*, 24: 725-744.
- Rahman, A., 1987. Infiltration under different ground covers in humid-equatorial environment. En: Y-S. Fok (ed.), *Infiltration: principles and practices*. International Conference on Infiltration Development and Application, Post-Conference Proceedings. Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. Honolulu, Estados Unidos. pp. 431-442.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Topp, G.C., 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, 136: 250-268.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
- Russo, D., Russo, I and Laufer, A., 1997. On the spatial variability of parameters of the unsaturated hydraulic conductivity. *Water Resources Research*, 33: 2207-2214.
- Sabaté, S. Calvet, S. and Gracia, A., 1992. Preliminary results of a fertilization-irrigation experiment in a *Quercus flex L.* forest in relation to leaves and twigs characteristics. *Vegetatio*, 99-100: 283-287.
- Sánchez-Andrés, R., 2002. Eficacia del manejo del suelo en una aforestación con encinas sobre tierras agrícolas de ambiente semiárido en la región central de España. Ph D Thesis. Universidad Autónoma de Madrid, Spain.
- Selby, M.J., 1970. *Hillslope materials and process*. Oxford University Press. Oxford. Inglaterra.
- Soil Survey Staff. 1990. *Keys to Soil Taxonomy*, 4th Edition. SMSS Technical Monograph 6, Virginia.
- Sonu, J., 1987. Modification of Green-Ampt infiltration equation for layered soil. En: Y-S. Fok (ed.), *Infiltration: principles and practices*. International Conference on Infiltration Development and Application, Post-Conference Proceedings. Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. Honolulu, Estados Unidos. pp. 27-36.
- Stothoff, S.A., Or, D., Groeneveld, D.P. and Jones, S.B., 1999. *Journal of Hydrology*, 218: 169-190.
- Terradas, J. and Save, R., 1992. The influence of summer and winter stress and water relationships on the distribution of *Quercus flex L.* *Vegetatio*, 99-100: 137-145.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985. Measurement of soil water content using Time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society. American Journal*. 49: 19-24.
- Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Whalley, W.B., 1995. Physical properties. En: A. Goudie (ed.), *Geomorphological Techniques*, Second Edition. British Geomorphological Research Group, Londres, Inglaterra, pp. 111-142.
- Withawatthutikul, P. and Rouysungnern, S., 1987. Infiltration of soils in various land uses in the South of Rayong Basin, Thailand. En: Y-S. Fok (ed.), *Infiltration: principles and practices*. International Conference on Infiltration Development and Application, Post-Conference Proceedings. Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. Honolulu, Estados Unidos. pp. 455-463.
- Zavattaro, L., Jarvis, N. and Persson, L., 1999. Use of similar scaling to characterize spatial dependence of near saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society American Journal*, 63: 486-492.
- Zhang, R., 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society American Journal*, 61: 1024-1030.
- Zhang, S. H. and Romane, F., 1988. The diameter growth of *Quercus flex L.* and the interannual variability of climatic characteristics. En: Di Castri, F., Floret, C., Rambal, S. and Roy, J. (Eds.), *Time scales and water stress*. I.U.B.S., Paris, pp. 391-399.
- Zhang, S.H. and Romane, F., 1991. Variations de la croissance radiale de *Quercus flex L.*, in fonction du climat. *Annals. Science. Forestre*. 48, 225-234.