

INFLUENCIA DE SEIS ESPECIES ARBÓREAS EN LA INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO

INFLUENCE OF SIX TREE SPECIES ON WATER INFILTRATION IN SOIL

Antonio Zapata-Sierra* y Francisco Manzano-Agugliaro

Departamento de Ingeniería Rural. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería. 04120. Almería, España. (ajzapata@ual.es)

RESUMEN

Los modelos de infiltración de agua en el suelo que dependen de una medida o dato puntual, como los de Kostiakov, Philips, Horton, y Green y Ampt, no consideran la influencia de los árboles circundantes. La hipótesis planteada en este trabajo fue que ésta puede influir en los valores genéricos tomados en campo y, por tanto, deben corregirse. Los factores que pueden influir son: la especie arbórea, la distancia al tronco, la altura del árbol y su manejo (cultivado o no). La infiltración fue medida con un infiltrómetro de doble anillo a varias distancias del tronco para tres especies de árboles cultivados con riego: *Citrus sinensis*, *Citrus limon*, *Olea europaea* y otras tres forestales: *Eucalyptus globulus*, *Pinus halepensis*, y *Tamarix canariensis*, así como sobre suelo desnudo y sobre una cubierta continua de césped (*Zoysia* spp). Realizados los ajustes a los distintos modelos, y tomando la conductividad hidráulica como parámetro para este estudio, se comprobó que es necesario corregir los parámetros de infiltración cuando se usan para superficies arboladas, que la infiltración decrece conforme aumenta la distancia al árbol, y que a mayor altura de éste, mayor es la alteración de la conductividad hidráulica del suelo. Esta metodología permite obtener la densidad óptima de árboles de cada especie, para mantener la infiltración en los mayores valores posibles.

Palabras clave: *Citrus limon*, *Citrus sinensis*, *Eucalyptus globulus*, *Olea europaea*, *Pinus halepensis*, *Tamarix canariensis*, *Zoysia* spp.

INTRODUCCIÓN

Durante una precipitación, el agua de lluvia se infiltra en el suelo a una velocidad máxima que depende de las características del suelo y de su grado de saturación (Chow *et al.*, 1994). Cualquier precipitación que supere dicha velocidad máxima quedará sobre el suelo y podrá contribuir a la escorrentía. La influencia de la vegetación sobre la infiltración del agua en el suelo ha sido documentada; así, Cook (1946, citado por Dunne *et al.*, 1991)

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Diciembre, 2007. Aprobado: Julio, 2008.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 835-845. 2008.

ABSTRACT

Models of water infiltration in soil that depend on a single data or measurement, such as those of Kostiakov, Philips, Horton, and Green and Ampt, do not consider the influence of surrounding trees. The hypothesis in this study was that this can influence the generic values taken in the field, and therefore, these values should be corrected. The following are factors that can have an influence: tree species, distance to trunk, tree height, and management (cultivated or not). Infiltration was measured with a double-ring infiltrometer at several distances from the trunk of three species of trees cultivated under irrigation: *Citrus sinensis*, *Citrus limon*, *Olea europaea*, another three forest species: *Eucalyptus globulus*, *Pinus halepensis*, and *Tamarix canariensis*, bare ground and continuous grass (*Zoysia* spp) cover. After fitting the different models and using hydraulic conductivity as a parameter for this study, it was demonstrated that it is necessary to correct infiltration parameters when they are used for tree covered areas, that infiltration decreases as distance to the tree increases, and that the higher tree cover, the greater the alteration of soil hydraulic conductivity. This methodology allows determination of the optimal density for each tree species to maintain infiltration at the highest possible values.

Key words: *Citrus limon*, *Citrus sinensis*, *Eucalyptus globulus*, *Olea europaea*, *Pinus halepensis*, *Tamarix canariensis*, *Zoysia* spp.

INTRODUCTION

During a rainfall, rainwater infiltrates into the soil at a maximum rate that depends on soil properties and degree of saturation (Chow *et al.*, 1994). When rainfall surpasses this maximum rate, it will stay on the soil surface and can contribute to runoff. The influence of vegetation on water infiltration on soil has been documented; thus, Cook (1946, cited by Dunne *et al.*, 1991) and Jiménez *et al.* (2006) observed a relationship of dependency between them.

Vegetation modifies infiltration in several ways. It can partially intercept rainwater and, later, together with rain drips from the canopy, it can modify the intensity (Rutter *et al.*, 1972; Aston, 1979) and drop

y Jiménez *et al.* (2006) observan una relación de dependencia entre ellas.

La vegetación modifica la infiltración de varias maneras: puede interceptar parcialmente el agua de lluvia y, junto con el posterior escurrimiento desde el dosel vegetal, modificar la intensidad (Rutter *et al.*, 1972, Aston, 1979) y el diámetro de gota (Calder, 1996) del agua que cae al suelo. En este proceso se reduce la intensidad de la lluvia y aumenta el diámetro de las gotas, permitiendo una mayor proporción de infiltración sobre el agua caída. A pesar de su mayor diámetro, las gotas tienen una menor cantidad de energía cinética al impactar desde menor altura (Wainwright *et al.*, 1999), y producen una menor alteración en la capa superficial del suelo, manteniendo un alto valor de la permeabilidad, que no se mantendría si el suelo recibiese el impacto de las gotas con toda su energía inicial. Así, la presencia de cubierta vegetal implica una capacidad de infiltración mayor.

Las raíces o sus restos generan macroporos (Archer *et al.*, 2002) por los que el agua circula a mayor velocidad y, más importante, por donde puede salir el aire atrapado en el suelo (Jarrett y Hoover, 1985) favoreciendo la circulación del agua y el drenaje hacia horizontes inferiores. En cierta medida las raíces de los árboles y arbustos modifican la topografía de su entorno, elevándola en torno al tronco y aumentando las fisuras y otros poros gruesos en esa zona. En estas condiciones la salida del aire atrapado también es favorecida (Dixon y Peterson, 1971). La elevación del terreno en torno a los árboles y el aumento de los poros gruesos en esta misma zona sugieren (Dunne *et al.*, 1991) la enorme influencia que la microtopografía tiene en el proceso de infiltración. La infiltración promedio crece con la intensidad de precipitación, debido a una extensión mayor de la zona saturada por encharcamiento y la extensión de esta zona saturada por la lámina de escorrentía recién formada (Dunne *et al.*, 1991). Además hay una gran variabilidad de la conductividad hidráulica en saturación dentro de un mismo tipo de suelo en suelos cubiertos por bosque (Buttle y House, 1997).

Según Lyford y Qashu (1969) la variación de la capacidad de infiltración es función de la distancia al tronco de determinados arbustos xerófitos. También se ha comprobado que árboles y arbustos modifican la distribución de humedad en el perfil después de una precipitación (Glover *et al.*, 1962), tendiendo a acumular agua en las proximidades de sus sistemas radiculares. Tradicionalmente se ha explicado este efecto como consecuencia de la redistribución de la precipitación hacia el centro de la planta forzada por

size (Calder, 1996) of the water that falls to the ground. In this process rain intensity is reduced and the drop diameter increases, allowing a larger portion of rainwater to infiltrate. In spite of their greater diameter, the drops have a lower amount of kinetic energy since their impact is from a lower height (Wainwright *et al.*, 1999), and they produce less alteration to the upper layer of the soil, maintaining high permeability values; this would not occur if the soil received the impact of the drops with their total initial energy. Thus, the presence of plant cover implies a higher infiltration capacity.

Roots, or their remains, create macropores (Archer *et al.*, 2002) through which water circulates at a higher speed and, more important, through which air trapped in the soil can escape (Jarrett and Hoover, 1985). This favors circulation of water and drainage toward lower horizons. To a certain extent, the roots of trees and bushes modify the topography of their surroundings. They elevate the ground and increase the number of fissures and other large pores around the trunk. In these conditions the exit of trapped air is also favored (Dixon and Peterson, 1971). Average infiltration increases with intensity of precipitation due to a larger extension of the saturated area and the extension of this saturated area by the recently formed laminar runoff flow (Dunne *et al.*, 1991). Besides, there is a large variability of hydraulic conductivity on saturation within the same soil type in soils covered by forest (Buttle and House, 1997).

Variation in infiltration capacity has been characterized in function of the distance of the trunk of certain xerophytic shrubs (Lyford and Qashu, 1969). It has also been shown that trees and shrubs modify the distribution of moisture in the profile after a rainfall (Glover *et al.*, 1962), with a tendency of water to accumulate near root systems. Traditionally, this effect has been explained as the consequence of rainfall redistribution forced toward the center of the plant because of the architecture of the branches. However, this phenomenon does not appear to be sufficiently documented.

Elevation of the ground around the trees and the increment of large pores in this same area suggest (Dunne *et al.*, 1991) the large influence of micropores on the process of infiltration.

Soil infiltration measurement is simple to interpret when flooding of a portion of soil surface delimited by an impermeable ring inserted a few centimeters in the soil. To simplify the modification of the phenomenon and obtain a measure of vertical infiltration, an additional larger concentric ring is included in the analysis to decrease lateral infiltration from the first zone. This device is known as a double-ring infiltrometer. Dunkerley

la arquitectura de las ramas. Sin embargo este fenómeno no parece estar suficientemente documentado.

La medida de la infiltración en suelos es sencilla de interpretar al inundar una porción de la superficie del suelo limitada por un anillo impermeable clavado a unos centímetros en el suelo. Para simplificar la modificación del fenómeno y obtener una medida de la infiltración vertical, se incluye en el análisis otro anillo mayor y concéntrico al primero que sirve para disminuir la infiltración lateral desde el primer recinto. Este dispositivo es conocido como infiltrómetro de doble anillo. Dunkerley (2000) y Sharrow (2007) proponen una corrección para cuando se use un anillo simple de pequeñas dimensiones: calcular la extensión de la zona mojada mediante la apertura de una zanja al final de cada ensayo. También se puede medir la infiltración mediante la inundación a presión constante (Bens *et al.*, 2006), con pequeños simuladores de lluvia, controlando el tiempo de encharcamiento y la escorrentía producida (Singh *et al.*, 1999) o interpretando datos de medidas con sonda de neutrones (Castro *et al.*, 2006).

Las propiedades del suelo están relacionadas con la textura (Smith y Parlange, 1978; Rawls *et al.*, 1983), la estructura (Beven y German, 1981) para suelos sin vegetación y con manejo del suelo (Sharrow, 2007). Según Blackburn *et al.* (1992) y Spaeth *et al.*, (1996), la infiltración se relaciona con numerosos tipos de comunidades vegetales indicando que la textura es un factor menos significativo que la vegetación. Por ejemplo, Johnson y Gordon (1988) indican que la velocidad de infiltración bajo arbustos es superior a la medida sobre cubierta herbácea o en suelo desnudo, efecto observado también en olivo (Castro *et al.*, 2006). En todos los casos se define el área de influencia en función de la extensión del dosel; Lyford y Qashu (1969) señalan la influencia de los arbustos hasta 1 m hacia el exterior del dosel. Los árboles y arbustos modifican (Gile *et al.*, 1998) las propiedades del suelo, la variación inducida (Dunkerley, 2000) es continua y las zonas entre arbustos son alteradas. Esto explica porqué la división tradicional entre zona cubierta y descubierta no permite mejoras significativas para explicar el proceso de lluvia y escorrentía.

El objetivo de este trabajo fue describir la variación de la infiltración en función de la distancia a árboles de distintas especies cultivadas con riego y forestales, y proponer un factor de corrección de los parámetros de infiltración para suelos con cubiertas arbóreas de densidad variable. Además, establecer un método para identificar la densidad óptima de planta y proponer un manejo del bosque para reforestaciones y aclareos con base en el criterio de captar el máximo de agua de lluvia.

(2000) and Sharrow (2007) propose a correction for the use of a single ring of small dimensions: calculate the extension of the wet zone by opening a ditch at the end of each test. Infiltration can also be measured by flooding at constant pressure (Bens *et al.*, 2006), with small rain simulators and controlling pooling time and produced runoff (Singh *et al.*, 1999) or by interpreting data from a neutron probe (Castro *et al.*, 2006).

Soil properties are related to texture (Smith and Parlange, 1978; Rawls *et al.*, 1983), structure (Beven and German, 1981) in soils without vegetation and with soil management (Sharrow, 2007). According to Blackburn *et al.* (1992) and Spaeth *et al.* (1996), infiltration is related to numerous types of plant communities indicating that texture is a less significant factor than vegetation. For example, Johnson and Gordon (1988) indicate that infiltration speed under shrubs is higher than that measured under herbaceous cover or bare soil, an effect also observed in olive (Castro *et al.*, 2006). In all cases, the area of influence is defined in function of the extension of the canopy; Lyford and Qashu (1969) define an area of influence of shrubs up to 1 m outside the canopy cover. Trees and shrubs modify soil properties (Gile *et al.*, 1998), the induced variation is continuous (Dunkerley, 2000) and areas between shrubs are affected. This explain why the traditional division between covered and uncovered area does not allow a significant improvement to explain the process of rainfall and runoff.

The objective of this study was to describe variations in infiltration in function of the distance from different species of trees cultivated under irrigation and forest species, and to propose a correction factor for infiltration parameters for soils with tree cover of variable density. Besides, to establish a method to identify the optimal plant density and propose a forest management scheme for reforestation and thinning based on the criterion of capturing the maximum amount of rainwater.

MATERIALS AND METHODS

Data were taken at three sites: on silty soils at the installations of the Centro de Investigación y Formación Agraria (CIFA-Center for Agricultural Research and Education) in Almería and those of the University of Almería, and on sandy loam soil at CIFA installations in La Mojenera. Coordinates are, respectively, 36° 50' N, 2° 24' W; 36° 49' N, 2° 24' W; and 36° 47' N, 2° 42' W (ED50 system).

Infiltration was measured with a double-ring infiltrometer. The initially added volume was controlled and the descent of the infiltrating water was measured as a function of time until it ended or until infiltration speed became notably constant. Infiltration tests were conducted at different distances from the trunk of each tree selected, assuring that they were sufficiently distant from others.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos se tomaron en tres localidades: sobre suelos limosos en las instalaciones del CIFA (Centro de Investigación y Formación Agraria) de Almería, y las de la Universidad de Almería, y sobre suelos franco-arenosos en las del CIFA de La Mojonera; con coordenadas 36° 50' N, 2° 24' O; 36° 49' N, 2° 24' O; y 36° 47' N, 2° 42' O (sistema ED50).

La infiltración fue medida con un infiltrómetro de doble anillo, controlando el volumen inicialmente añadido y midiendo el descenso de la lámina de agua en función del tiempo, hasta que se agotaba o hasta que la velocidad de infiltración era sensiblemente constante. Se realizaron ensayos de infiltración para diferentes distancias hasta el tronco de cada árbol, escogiendo árboles suficientemente aislados de los demás.

Los ensayos fueron realizados en diferentes especies, en regadío: naranjo (*Citrus sinensis* L. Osbeck), limonero (*Citrus limon* L. Burman) y olivo (*Olea europaea* L.); y en seco: eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill), pino carrasco (*Pinus halepensis* Miller) y tamarisco (*Tamarix canariensis* Wiled), así como sobre cubierta de césped (*Zoysia* spp) y suelo desnudo. La infiltración fue medida en las especies arbóreas a diferentes distancias del tronco, variables en función de la especie y de la altura del árbol.

Para el naranjo (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 1.75 m); limonero (0, 0.5, 1, 1.5, 1.75, 2, 2.5, 3 m); olivo (0, 0.75, 1.1, 1.5, 2.15, 2.25 m); eucalipto (0.6, 1.6, 2.5, 6.2 m); pino (0, 1.5, 2.5, 3 m); tamarisco (0, 1.8, 2.8, 4.2 m).

Mediante los ensayos se obtuvieron datos de infiltración acumulada, $F(LT^{-1})$ en función del tiempo (t) que se usaron para ajustar los parámetros de las expresiones de Kostiakov, Philips, Horton y Green y Ampt (Chow *et al.*, 1994).

La ecuación de Kostiakov es muy sencilla de ajustar ya que es linealizable:

$$F = k_k t^a \quad (1)$$

donde, k_k es un coeficiente de ajuste (LT^{-a-1}) y a un exponente.

Es frecuente establecer una referencia entre el tipo de suelo y su velocidad de infiltración. Así se encuentra la denominación de Familia de Infiltración I_F (SCS, 1972, citado por Chow *et al.*, 1994) para referirse a suelos en función de su velocidad de infiltración a las 6 h, expresada en pulgadas h^{-1} .

La ecuación de Philips, derivado de la ecuación de Richards (Philip, 1957 citado por Chow *et al.*, 1994), es una serie polinómica de la que se toma sólo los dos primeros términos. En este caso, el coeficiente $B(LT^{-1})$ está relacionado con la conductividad hidráulica en saturación y $A_b(LT^{-1/2})$, conocido como absorptividad, también está relacionado con la humedad inicial del suelo. Esta ecuación puede ajustarse exactamente por mínimos cuadrados:

$$F = A_b t^{1/2} + Bt \quad (2)$$

Tests were conducted with different species: under irrigation: orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck), lemon (*Citrus limon* L. Burman), and olive (*Olea europaea* L.), rainfed, *Eucalyptus globulus* Labill), Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller), and tamarisk (*Tamarix canariensis* Wiled), ground covered with grass (*Zoysia* spp) and bare soil. Infiltration was measured in the tree species at different distances from the trunk, variables according to the species and the height of the tree.

For orange (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 1.75 m); lemon (0, 0.5, 1, 1.5, 1.75, 2, 2.5, 3 m); olive (0, 0.75, 1.1, 1.5, 2.15, 2.25 m); eucalyptus (0.6, 1.6, 2.5, 6.2 m); pine (0, 1.5, 2.5, 3 m); tamarisk (0, 1.8, 2.8, 4.2 m).

From the tests, data were obtained on accumulated infiltration, $F(LT^{-1})$ as a function of time (t), which were used to fit parameters of the equations developed by Kostiakov, Philips, Horton and Green, and Ampt (Chow *et al.*, 1994).

The Kostiakov equation is simple to fit since it is linearizable:

$$F = k_k t^a \quad (1)$$

where k_k is a coefficient of adjustment (LT^{-a-1}) and a an exponent.

Frequently, a reference between soil type and its infiltration rate is established. Thus, the denomination Infiltration Family I_F (SCS, 1972, cited by Chow *et al.*, 1994) is found, referring to soils as a function of their infiltration rate within a time interval of 6 h and expressed in inches h^{-1} .

Philip's equation, derived from the equation of Richards (Philip, 1957, cited by Chow *et al.*, 1994), is a polynomial series from which only the first two terms are taken. In this case, the coefficient $B(LT^{-1})$ is related to hydraulic conductivity at saturation and $A_b(LT^{-1/2})$, known as sorptivity, is also related to initial soil moisture. This equation can be fit exactly by minimum squares:

$$F = A_b t^{1/2} + Bt \quad (2)$$

In the Horton equation (equation 3) are found the following parameters: $f_c(LT^{-1})$ related to hydraulic conductivity at saturation, $f_0(LT^{-1})$ related to soil moisture and indicates the maximum expected increase in infiltration rate; and $k_H(T^{-1})$, which marks the speed of transition between the two values, t being time. Because of the configuration of these parameters within the equation, it is difficult to find an exact method for fitting the equation, as in the two previous cases, but it is possible to approximate the parameters of the model using techniques of optimization of the function sum of squared errors:

$$F = f_c t + \left(\frac{f_0 - f_c}{k_H} \right) (1 - e^{-k_H t}) \quad (3)$$

Equation (4) (Green and Ampt, 1911, cited by Chow *et al.*, 1994) includes the value of hydraulic conductivity at saturation $k_s(LT^{-1})$, increase in humidity produced between the flooded surface

En la ecuación de Horton (ecuación 3) están los parámetros: $f_c(LT^{-1})$ relacionados con la conductividad hidráulica en saturación, $f_0(LT^{-1})$, que lo está con la humedad del suelo e indica el máximo aumento de la velocidad de infiltración esperado; y $k_H (T^{-1})$, que marca la rapidez de la transición entre ambos valores, siendo t el tiempo. Debido a la configuración de estos parámetros dentro de la ecuación, es difícil encontrar un método exacto para ajustar la ecuación, como en los dos casos anteriores, pero es posible estimar aproximadamente los parámetros del modelo mediante técnicas de optimización de la función suma de errores al cuadrado:

$$F = f_c t + \left(\frac{f_0 - f_c}{k_H} \right) (1 - e^{-k_H t}) \tag{3}$$

La ecuación (4) (Green y Ampt, 1911, citado por Chow *et al.*, 1994) incluye el valor de la conductividad hidráulica en saturación $k_s(LT^{-1})$, el aumento de humedad producido entre la superficie inundada y la humedad inicial del suelo $\Delta\theta$, un estimador de la diferencia de potencial de tensión del suelo entre el frente de avance y la superficie $\Delta\psi_{av}$ (L) siendo t el tiempo. Estos parámetros pueden ser aproximados mediante funciones de transferencia como las propuestas por Rawls *et al.* (1983) con datos de textura. El ajuste de esta ecuación se realiza de modo similar a la ecuación 3:

$$F = k_s t + \Delta\psi_{av} \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F}{\Delta\psi_{av} \Delta\theta} \right) \tag{4}$$

con

$$\Delta\psi_{av} = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \tag{5}$$

donde, λ es el índice de poros del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todos los casos se ajustaron los valores de los parámetros de cada modelo de infiltración, ecuaciones 1, 2, 3 y 4, para todas las especies estudiadas y en cada distancia usada hasta el tronco del árbol en la toma de datos. En la Figura 1 se muestra un ejemplo del resultado del proceso de ajuste mediante optimización de una de las series de datos. En el Cuadro 1 se observa, como ejemplo, los valores estimados de los parámetros de cada modelo de infiltración en todas las distancias medidas para el eucalipto.

La conductividad hidráulica k_s es el parámetro de mayor interés en la descripción de las propiedades hidrológicas del suelo. El valor de k_s se hizo adimensional, dividiendo el valor encontrado por el valor previsto en función de la textura de cada suelo, $k_s^* = k_s / k_s^{\text{textura}}$, según las funciones de transferencia de Rawls *et al.* (1983). Los valores adimensionales calculados, $Y^* = k_s /$

and initial soil moisture $\Delta\theta$, and an estimator of the difference in soil tension potential between the advancing edge and the surface $\Delta\psi_{av}$ (L), t being time. These parameters can be approximated using transference functions such as those proposed by Rawls *et al.* (1983) with texture data. This equation is fit in a manner similar to that for equation 3:

$$F = k_s t + \Delta\psi_{av} \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F}{\Delta\psi_{av} \Delta\theta} \right) \tag{4}$$

with

$$\Delta\psi_{av} = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \tag{5}$$

where λ is the index of soil pores.

RESULTS AND DISCUSSION

In all cases, equations 1, 2, 3, and 4, parameter values of each infiltration model were fitted for all the species studied and at each distance used to the tree trunk in data collection. In Figure 1 it is shown an example of the result of the fitting process using optimization of one of the series of data. As an example, in Table 1 are found the estimated values of the parameters of each infiltration model at all of the distances measured for eucalyptus.

Hydraulic conductivity, k_s is the parameter of greatest interest in the description of the soil hydrological properties. The value of k_s was made adimensional by dividing the value found for the texture value of each soil, k_s^{texture} , according to

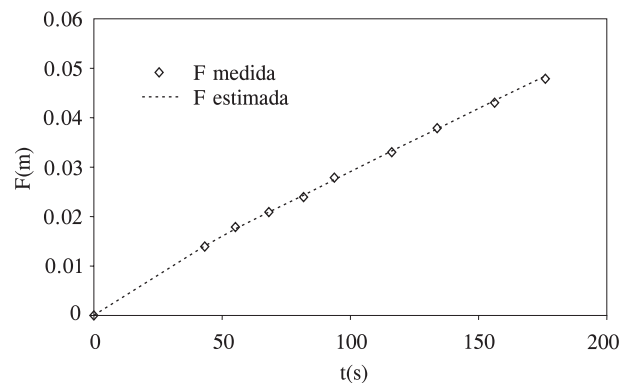


Figura 1. Valores medidos de infiltración (m) en función del tiempo (s) (F medida) y curva ajustada (F estimada) para la expresión de Green y Ampt en naranja a 0.5 m del tronco.

Figure 1. Measured infiltration values (m) as a function of time (s) (F measured) and fitted curve (F estimated) for the Green and Ampt equation with orange at 0.5 m from the trunk.

Cuadro 1. Valores de ajuste para los parámetros estudiados y distancias de medida en eucalipto.
Table 1. Fit values for the parameters studied and distances measured in eucalyptus.

Modelo	Parámetro	r(m)			
		0.20	1.50	2.50	3.00
Kostiakov	k_k (m·s ^(-a-1))	$2.82 \cdot 10^{-4}$	$3.28 \cdot 10^{-4}$	$5.16 \cdot 10^{-5}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$
	a (adim.)	0.889	0.693	0.706	0.702
	I_F ("·h ⁻¹)	11.799	1.52	0.27	1.35
Philip	B (m·s ⁻¹)	$1.36 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-5}$	$1.73 \cdot 10^{-6}$	$9.52 \cdot 10^{-6}$
	A_b (m·s ^{-0.5})	$3.08 \cdot 10^{-4}$	$7.66 \cdot 10^{-4}$	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$6.99 \cdot 10^{-4}$
Horton	f_c (m·s ⁻¹)	$1.55 \cdot 10^{-4}$	$2.73 \cdot 10^{-5}$	$4.60 \cdot 10^{-6}$	$1.52 \cdot 10^{-5}$
	f_0 (m·s ⁻¹)	$2.85 \cdot 10^{-4}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$	$7.10 \cdot 10^{-5}$	$8.50 \cdot 10^{-5}$
	k_H (s ⁻¹)	0.118	0.008	0.037	0.004
Green y	$\Delta\psi_{av}$ (m)	0.016	0.109	0.100	0.157
Ampt	$\Delta\theta$ (adim.)	0.041	0.129	0.157	0.156
	k_s (m·s ⁻¹)	$1.45 \cdot 10^{-4}$	$1.94 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$	$1.10 \cdot 10^{-5}$

k_s textura, se relacionaron con la distancia normalizada hasta el tronco, $r^* = d/h$, siendo d la distancia entre el tronco y el punto de ensayo y h la altura del árbol. Los parámetros de una función exponencial (6) fueron ajustados mediante mínimos cuadrados:

$$Y^* = C + A \cdot \exp(B \cdot r^*) \quad (6)$$

Para evaluar el grado de ajuste obtenido se usó un coeficiente de variación (cv) definido como:

$$cv = \frac{\sum (V_{\text{estimado}} - V_{\text{medido}})^2}{n \cdot V_{\text{medido}}} \quad (7)$$

donde, V_{estimado} es cada uno de los valores estimados por el modelo, y V_{medido} es cada uno de los valores medidos. En el Cuadro 2 se muestran los valores obtenidos para las especies estudiadas.

Dado que no todos los parámetros estudiados están disponibles en las funciones de transferencia propuestas por Rawls *et al.* (1983) y para hacer el análisis lo más independiente del suelo, se relacionó cada valor obtenido con el que se obtiene a una distancia igual a la altura del árbol. Si se considera que hay una relación entre la altura de un árbol y el alcance horizontal de sus raíces, esa distancia es considerada suficiente. En la Figura 2 se muestra que, al menos para la conductividad hidráulica (k_s), es válida esta afirmación. En la Figura 2 se muestran los resultados para especies cultivadas y también para las especies forestales; *T. canariensis* fue incluido en ambas para permitir la comparación entre los dos conjuntos de especies.

the transference functions of Rawls *et al.* (1983). The adimensional values calculated, $Y^* = k_s/k_s \text{ textura}$, were related to the normalized distance to the trunk, $r^* = d/h$, d being the distance between the trunk and testing point, and h tree height. The parameters of an exponential function (6) were fitted by minimum squares:

$$Y^* = C + A \cdot \exp(B \cdot r^*) \quad (6)$$

To evaluate the degree of fit obtained, a coefficient of variation (cv) was used, defined as:

$$cv = \frac{\sum (V_{\text{estimated}} - V_{\text{measured}})^2}{n \cdot V_{\text{measured}}} \quad (7)$$

where $V_{\text{estimated}}$ is each of the values estimated by the model, and V_{measured} is each of the measured values.

Cuadro 2. Coeficientes de ajuste de la conductividad hidráulica adimensional respecto a la distancia adimensional a una función exponencial.

Table 2. Coefficients of fit of adimensional hydraulic conductivity with respect to the adimensional distance to an exponential function.

Especie	A	B	C	cv (%)
<i>Eucalyptus globulus</i>	737.14	-9.95	6.39	0.2
<i>Pinus halepensis</i>	2,665.54	-9.04	67.06	4.5
<i>Tamarix canariensis</i>	922.80	-12.05	0.62	0.2
<i>Citrus limon</i>	16.41	-9.15	0.84	2.4
<i>Citrus sinensis</i>	126.83	-17.38	1.89	10.4
<i>Olea europaea</i>	2.00	-31.99	1.00	20.6
<i>Zoysia</i> spp.	0	0	0.71	22.8

A, B y C son los parámetros de ajuste de la ecuación 6.

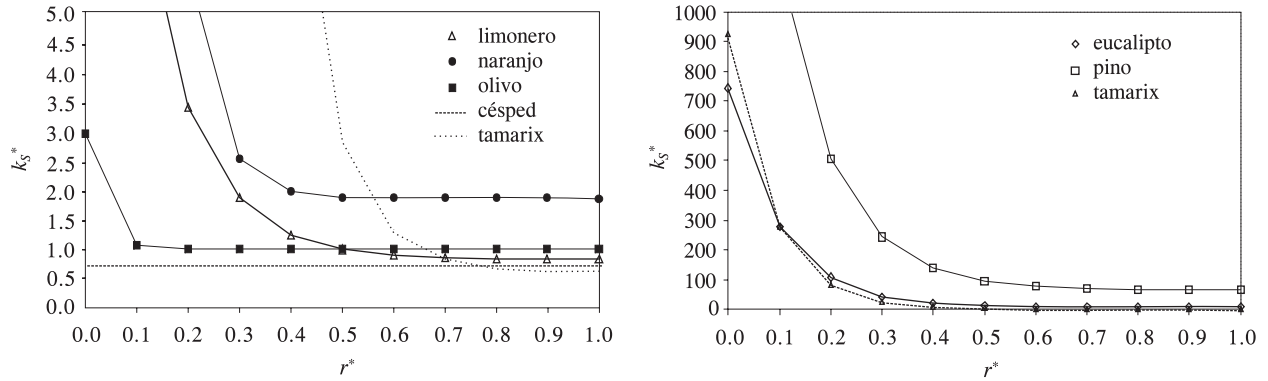


Figura 2. Variación de la conductividad hidráulica adimensional (k_s^*) respecto a la distancia adimensional (r^*).
 Figure 2. Variation in adimensional hydraulic conductivity (k_s^*) with respect to the adimensional distance (r^*).

Los valores de cada parámetro P fueron normalizados en función del valor encontrado a una distancia igual a la altura del árbol, P_h . Los valores normalizados $P^{**}=P/P_h$, y la distancia normalizada r^* , se ajustaron mediante optimización a una función exponencial como la expresada en la ecuación 6. Los coeficientes resultantes del ajuste están en los Cuadros 3 y 4.

La mayoría de los modelos hidrológicos son agregados (Chow *et al.*, 1994), por lo que requieren un único dato para cada propiedad del suelo. Se propone un factor de corrección en función del tipo de árbol y de la densidad de planta, para corregir los valores estimados a través de la textura o medidos en suelo

The values obtained for the species under study are shown in Table 2.

Given that not all of the studied parameters are available in the transference functions proposed by Rawls *et al.* (1983) and, to make the analysis as independent from the soil as possible, each resulting value was related to the value with which a distance equal to tree height was obtained. Considering that there is a relationship between tree height and the horizontal length of its roots, this distance was considered to be sufficient. In Figure 2 it is shown that, at least for hydraulic conductivity (k_s), this affirmation is valid. In Figure 2 the results for cultivated species and also for

Cuadro 3. Coeficientes de ajuste (A, B y C) para los diferentes parámetros normalizados P^{**} de cada parámetro P respecto al valor obtenido P_h para una distancia r igual a la altura del árbol h ($P^{**}=P/P_h$) para las especies forestales y cada modelo de infiltración. Coeficiente de variación cv.

Table 3. Coefficients of fit (A, B and C) for the different normalized parameters P^{**} of each P parameter with respect to the P_h value obtained for an r distance equal to the tree height h ($P^{**}=P/P_h$) for the forest species and each infiltration model. Coefficient of variation cv.

	Kostiakov			Philips		Horton			Green y Ampt		
	k_k^{**}	a^{**}	I_F^{**}	B^{**}	A_b^{**}	f_c^{**}	f_0^{**}	k_H^{**}	$\Delta\psi_{av}^{**}$	$\Delta\theta^{**}$	k_s^{**}
<i>Eucalyptus globulus</i>											
A	2.02	1.62	14.81	38.31	15.58	11.08	-2.63	-1.41	-12.22	-1.20	120.48
B	-0.23	-0.30	-1.95	-6.40	-0.11	-0.88	-22.46	-4.56	-31.02	-5.08	-9.95
C	-0.68	-0.22	-1.50	2.70	-13.06	-4.01	1.11	1.09	1.06	1.05	1.04
cv	0.12	0.03	0.06	0.16	0.15	0.08	0.03	0.16	0.03	0.07	0.00
<i>Pinus halepensis</i>											
A	0.85	0.46	13.53	21.56	-1.98	13.98	3.38	51.90	0.05	-1.84	18.12
B	-1.37	-1.84	-13.25	-11.26	-0.14	-9.65	-3.62	-22.07	4.61	-1.20	-8.85
C	0.33	0.79	0.69	0.56	2.59	0.71	0.40	3.59	0.23	2.02	0.43
cv	0.21	0.02	0.06	0.04	0.26	0.05	0.05	0.15	0.14	0.05	0.05
<i>Tamarix canariensis</i>											
A	8369.	-3.50	8061.	85.77	7740.	13458.	436.	0.01	12358.	508.	922.
B	-13.27	-15.41	-13.23	-1.01	-13.20	-13.53	-10.06	1.87	-13.10	0.00	-11.26
C	0.98	1.00	0.98	-19.77	0.98	1.00	0.98	0.90	0.90	-507.	0.99
cv	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

Cuadro 4. Coeficientes de ajuste (A, B y C) para los diferentes parámetros normalizados P^{} de cada parámetro P respecto al valor obtenido P_h para una distancia r igual a la altura del árbol h ($P^{**}=P/P_h$) para las especies cultivadas y cada modelo de infiltración. Coeficiente de variación cv.**

Table 4. Coefficients of fit (A, B and C) for the different normalized parameters P^{} of each P parameter with respect to the P_h value obtained for an r distance equal to the tree height h ($P^{**}=P/P_h$) for cultivated species and each model of infiltration. Coefficient of variation cv.**

	Kostiakov			Philips		Horton			Green y Ampt		
	k_k^{**}	a^{**}	I_F^{**}	B^{**}	A_b^{**}	f_c^{**}	f_0^{**}	k_H^{**}	$\Delta\psi_{av}^{**}$	$\Delta\theta^{**}$	k_s^{**}
<i>Citrus limon</i>											
A	-33.83	0.51	12.80	25.16	-1.22	8.14	9.04	81.01	-1.85	-0.84	16.41
B	-187.85	-4.85	-7.89	-10.58	-15.86	-10.55	-128.37	-175.	-34.79	-4.26	-9.14
C	1.60	0.94	0.64	0.46	1.42	1.00	1.18	0.69	1.05	1.12	0.84
cv	0.39	0.07	0.09	0.08	0.21	0.01	0.19	0.12	0.02	0.23	0.02
<i>Citrus sinensis</i>											
A	141.35	-19.30	88.62	132.2	30.00	127.1	50.00	6722.	2.00	1.00	126.14
B	-15.03	-76.85	-18.88	-19.86	-9.00	-18.63	-18.63	-45.85	-18.63	-5.00	-17.38
C	0.46	1.05	1.00	2.23	0.60	2.10	2.10	28.14	0.90	0.60	1.88
cv	0.15	0.04	0.06	0.10	0.36	0.10	0.32	0.06	0.04	0.12	0.10
<i>Olea europaea</i>											
A	2.00	1.00	0.30	2.00	2.00	1.25	1.25	0.60	0.45	0.50	0.98
B	-0.75	-6.00	-2.00	-4.00	-2.50	-2.00	-2.00	-1.50	-0.05	-0.05	-1.50
C	0.50	0.80	1.00	0.50	0.30	0.50	0.40	0.20	0.60	0.50	0.35
cv	0.27	0.15	0.21	0.20	0.26	0.18	0.45	0.27	0.02	0.10	0.19
<i>Zoysia spp.</i>											
C	0.37	1.26	1.74	1.82	0.79	0.78	0.71	0.85	1.69	1.02	0.71

sin vegetación. Se preparó un programa informático que generaba aleatoriamente la posición de los árboles seleccionados y también un conjunto de puntos de control para realizar esta corrección suponiendo válido el principio de superposición y promediando los resultados de todos los puntos (Figura 3).

La conductividad hidráulica en saturación fue evaluada como el parámetro más significativo de la infiltración en cada punto. Se observó que el factor de corrección para la conductividad hidráulica normalizada aumenta con el tamaño del árbol y su densidad. En la Figura 4 se aprecia este efecto en todas las especies estudiadas, con valores máximos para las especies forestales: *P. halepensis*, *E. globulus* y *T. canariensis*, entre 140 y 16 veces la conductividad esperada en función de la textura del suelo.

Los cultivos con riego mostraron un efecto menor, como parece razonable dado el menor desarrollo radicular que necesitan. El caso del olivo es llamativo, ya que muestra una escasa variación de la permeabilidad, lo que se puede explicar por estar con riego intensivo.

El análisis de los resultados muestra que la infiltración máxima, independientemente del suelo, fue obtenida con densidades cercanas a 100 árboles ha^{-1} , y para los árboles forestales estudiados fue alcanzada con una menor densidad, siempre que su altura sea de 15 a 20 m.

forest species are shown; *T. canariensis* was included in both to allow comparisons between both sets of species.

The values of each parameter P were normalized as a function of the value found at a distance from the tree equal to its height, P_h . The normalized values

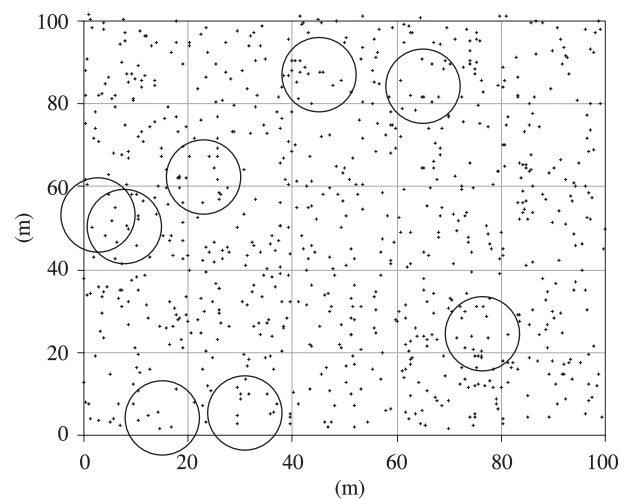


Figura 3. Ejemplo de distribución aleatoria de árboles (○) y puntos de control (+). Distancias en metros (m).

Figure 3. Example of random distribution of trees (○) and control points (+). Distances in (m).

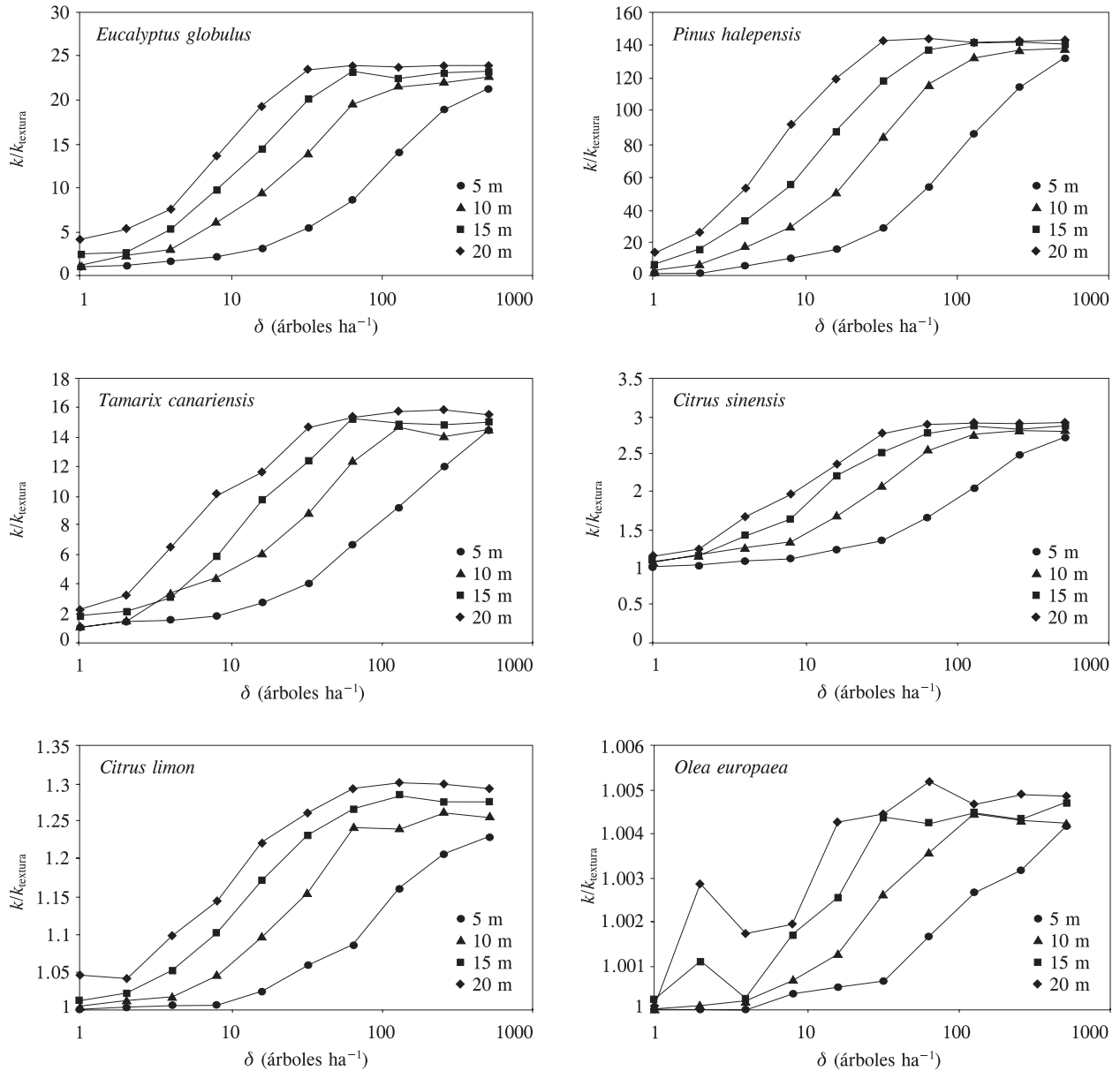


Figura 4. Conductividad hidráulica normalizada (k/k_{textura}) mediante el valor obtenido a partir de la textura, en función de la densidad de los árboles (δ) y de la altura de los mismos (5, 10, 15 y 20 m).
 Figure 4. Normalized hydraulic conductivity (k/k_{textura}) using the obtained texture value, in function of tree density (δ) and tree height (5, 10, 15, and 20 m).

CONCLUSIONES

Si la toma de datos es única o está basada en las funciones de transferencia del suelo en modelos hidrológicos agregados, se ha comprobado que es necesario corregir los parámetros de infiltración cuando se usan para superficies arboladas.

Es posible concluir que la infiltración decrece continuamente conforme aumenta la distancia al árbol y que a mayor altura de éste, mayor es la alteración de la conductividad hidráulica del suelo. Esta

$P^{**} = P/P_h$ and the normalized distance r^* were fit by optimizing an exponential function like that expressed in equation 6. The resulting coefficients of the fit are shown in Tables 3 and 4.

Most hydrological models are aggregated (Chow *et al.*, 1994), and thus require a single data for each soil property. A correction factor is proposed, in function of tree type and plant density, to correct values estimated with texture or measured in soil with no vegetation. A computer program was prepared that randomly generated position of selected trees and also

variación es mucho menor cuando hay agua de riego disponible.

La metodología usada en este trabajo permitió obtener la densidad óptima de árboles para cada especie con el objetivo de mantener la infiltración en los mayores valores posibles.

LITERATURA CITADA

- Archer, N. A. L., J. N. Quinton, and T. M. Hess. 2002. Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain. *J. Arid Environ.* 52(4): 535-553.
- Aston, A. R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. *J. Hydrol.* 42: 383-396.
- Bens, O., N. A. Wahl, H. Fischer, and R.F. Hüttl. 2006. Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *Eur. J. For. Res.* 126(1): 101-109.
- Beven, K., and P. German. 1981. Water flow in soil macropores. A combined flow model. *J. Soil Sci.* 126: 269-279.
- Blackburn, W. H., F. B. Pierson, C. L. Hanson, T. L. Thurow, and A. L. Hanson. 1992. The spatial and temporal influence of vegetation on surface soil factors in semiarid rangelands. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 35: 479-486.
- Buttle, J. M., and D. A. House. 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *J. Hydrol.* 203: 127-142.
- Calder, I. R. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: Development of the two-layer stochastic model. *J. Hydrol.* 185: 363-378.
- Castro, G., P. Romero, J. A. Gómez, and E. Fereres. 2006. Rainfall redistribution beneath an olive orchard. *Agric. Water Manag.* 86: 249-258.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, y L. W. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. Ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá. 584 p.
- Dixon, R. M., and A. E. Peterson. 1971. Water infiltration control: A channel system concept. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 968-973.
- Dunkerley, D. 2000. Hydrologic effects of dryland shrubs: defining the spatial extent of modified soil water uptake rates at an Australian desert site. *J. Arid Environ.* 45: 159-172.
- Dunne, T., W. Zhang, and B. F. Aubry. 1991. Effects of rainfall, vegetation, and Microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Res.* 27: 2271-2285.
- Gile, L. H., R. P. Gibbens, and J. M. Lenz. 1998. Soil-induced variability in root systems of creosotebush (*Larrea tridentata*) and tarbush (*Flourensia cernua*). *J. Arid Environ.* 39: 57-78.
- Glover, P. E., J. Glover, and M. D. Gwynne. 1962. Light rainfall and plant survival in E. Africa, II, Dry grassland vegetation. *J. Ecol.* 50: 199-206.
- Jarrett, A. R., and J. R. Hoover. 1985. Evaluating the effect of increasing concentrations of CO₂ on infiltration rate. *Trans. ASAE.* 28: 179-182.
- Jiménez, C. C., M. Tejedó, G. Morillas, and V. Neris. 2006. Infiltration rate in andosols: Effect of change in vegetation cover. *Journal of Soil and Water Conservation.* 61.3: 153-158.
- Johnson, C. W., and N. D. Gordon. 1988. Runoff and erosion from rainfall simulator plots on sagebrush rangeland. *Trans. ASAE.* 31: 421-427.
- Lyford, F. P., and H. K. Qashu. 1969. Infiltration rates affected by desert vegetation. *Water Resources Res.* 5: 1373-1376.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and N. Miller. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraulic Eng. ASCE* 109: 62-70.

a set of control points for this correction assuming that the principle of superposition is valid and averaging the results of all of the points (Figure 3).

Hydraulic conductivity at saturation was evaluated to be the most significant infiltration parameter at each point. It was observed that the correction factor for normalized hydraulic conductivity increases with tree size and density, In Figure 4 this effect is observed for all species studied, with maximum values for forest species: *P. halepensis*, *E. globulus* y *T. canariensis*, between 140 and 16 times the conductivity expected as a function of soil texture.

Cultivated, irrigated trees showed a smaller effect, which seems to be reasonable given that they need less root development. A notable case is olive with which variation in permeability is very small; this can be explained by its intensive irrigation.

The analysis of the results show that maximum infiltration, regardless of the soil, was obtained with densities close to 100 trees ha⁻¹, and for the forest species studied this was achieved with lower density, when their height is 15 to 20 m.

CONCLUSIONS

If data collection is singular or is based on functions of soil transference in aggregated hydrological models, it has been demonstrated that it is necessary to correct infiltration parameters when they are used for areas with tree cover.

It is possible to conclude that infiltration decreases continuously in the measure that distance to the tree increases. The taller the tree, the greater is the alteration in soil hydraulic conductivity. Variation is much smaller when water from irrigation is available.

The methodology used in this study permitted determination of the optimal tree density for each species with the aim of maintaining infiltration at the highest possible values.

—End of the English version—



- Rutter, A. J., K. A. Kershaw, P. C. Robins, and A. J. Morton. 1972. A predictive model of rainfall interception in forests, 1 Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9: 367-385.
- Sharrow, S. H. 2007. Soil compaction by grazing livestock in silvopastures as evidenced by changes in soil physical properties. *Agrofor. Systems* 71(3): 215-223.
- Singh, R., N. Panigrahy, and G. Philip. 1999. Modified rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. *Agric. Water Manag.* 41: 167-175.
- Smith R. E., and J-Y Parlange. 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Res.* 14: 533-538.

Spaeth, K. E., F. B. Pierson, M. A. Wertz, and J. B. Awang. 1996. Gradient analysis of infiltration and environmental variables as related to rangeland vegetation. *Trans. ASAE*. 39: 67-77.

Wainwright, J., A. J. Parsons, and A. D. Abrahams. 1999. Rainfall energy under creosotebush. *J. Arid Environ.* 43: 111-120.