

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LA ONDA CINEMÁTICA AL ESTUDIO DE HIDROGRAMAS GENERADOS MEDIANTE SIMULADOR DE LLUVIA SOBRE SUELOS PERMEABLES

APPLICATION OF KINEMATIC WAVE THEORY TO THE STUDY OF HYDROGRAPHS GENERATED THROUGH A RAIN SIMULATOR ON PERMEABLE SOILS

Antonio Zapata-Sierra, Francisco Manzano-Agugliaro*

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

RESUMEN

Para el estudio de los hidrogramas generados mediante simulador de lluvia y cuando el suelo presenta una capacidad de infiltración alta el método original de Singh no funciona bien. Para ello se propone un método basado en la superposición de soluciones parciales, generadas a partir de la teoría de la onda cinemática para obtener un hidrograma combinado. En este estudio se fabricó un simulador de lluvia donde se realizaron 16 ensayos de escorrentía sobre un suelo permeable. Al comparar los resultados obtenidos entre el método original y el propuesto, se mostró que se puede aplicar con buenos resultados la metodología de la onda cinemática para generar la respuesta a la lluvia en este tipo de sistemas. Además se mostró la influencia de la intensidad de la precipitación en el movimiento del agua sobre el suelo y se propone una actualización de los parámetros de la ecuación original de Chow.

Palabras clave: infiltración, escorrentía, factor de fricción.

INTRODUCCIÓN

Un enfoque habitual en el estudio de la infiltración y escorrentía para cuencas naturales o de gran tamaño es considerar la cuenca completa como un sistema lineal en el que el proceso de lluvia-escorrentía es tratado como un conjunto de impulsos y respuestas donde los impulsos son las precipitaciones en exceso y las respuestas son hidrogramas que deberán combinarse entre sí, suponiendo que se cumple el principio de proporcionalidad y el principio de superposición (Kreyszig, 1968, citado

ABSTRACT

For the study of the hydrographs generated by a rainfall simulator and when the soil has a high infiltration capacity the Singh's original method does not work properly. For this reason, a method based on the superposition of partial solutions generated from the kinematic wave theory is proposed to obtain a combined hydrograph. In this study, a rainfall simulator was built where there were 16 runoff trials on a permeable soil. By comparing the obtained results between the original and the proposed method, it was shown that the kinematic wave methodology can be applied with good results to generate the response to rainfall in this type of systems. It was also shown the influence of rainfall intensity water movement over the ground and an update of the parameters of the original Chow's equation is proposed.

Key words: infiltration, runoff, friction factor.

INTRODUCTION

A common approach in the study of infiltration and runoff for natural or large size watersheds is to consider the entire watershed as a linear system where the rainfall-runoff process is treated as a set of pulses and responses where pulses are the excessive precipitations and responses are hydrographs to be combined, assuming compliance with the principle of proportionality and the principle of superposition (Kreyszig, 1968, cited by Chow *et al.*, 1994). A simplified scheme of the process is in Figure 1, where for a series of pulses i_1 , i_2 , i_3 some answers Q_1 , Q_2 , Q_3 are generated to obtain a joint response Q_T to the set of all incoming pulses through the integral of convolution.

For the practical application of this methodology is usual to require several conditions in the model

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Marzo, 2009. Aprobado: Octubre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 873-884. 2010.

por Chow *et al.*, 1994). Un esquema simplificado del proceso está en la Figura 1, donde para una serie de impulsos i_1 , i_2 , i_3 se generan unas respuestas Q_1 , Q_2 , Q_3 , para obtener una respuesta conjunta Q_T al conjunto de todos los impulsos entrantes, mediante la integral de convolución.

Para una aplicación práctica de esta metodología es usual exigir varias condiciones en el modelo (Chow *et al.*, 1994): 1) el exceso de precipitación está uniformemente distribuido por la cuenca; 2) la duración de la respuesta debe ser constante; 3) las ordenadas de las respuestas son proporcionales a la escorrentía directa representada en cada hidrograma; 4) para cada cuenca el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado representa las características no cambiantes de la cuenca.

Si se cumplen las condiciones expuestas para un impulso unitario, definido usualmente como un exceso de precipitación de 1 mm h^{-1} o bien 1 pulgada h^{-1} en la metodología original propuesta por Sherman (1932), la función de respuesta de la cuenca es conocida como hidrograma unitario. La aplicación de este concepto permite analizar la respuesta de una cuenca ante precipitaciones cambiantes en el tiempo, aplicando una integral de convolución. Los conceptos de tiempo de retraso, tiempo de pico y duración efectiva de un hidrograma unitario están en la Figura 2.

Los simuladores de lluvia se usan en la experimentación hidrológica para estudiar la escorrentía (Croley y Foster, 1984; Singh *et al.*, 1999; Lima y Singh, 2003). El concepto de onda cinemática se utiliza para resolver problemas de movimientos unidimensionales gradualmente variados en corrientes libres (Chow, 1959; Chow *et al.*, 1994). Las ecuaciones propuestas por Barre de Saint-Venant en 1871 constituyen un balance de materia y de cantidad de movimiento a escala diferencial y describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto. Partiendo de estas ecuaciones se resolvería cualquier problema de flujo eligiendo correctamente las condiciones de borde o frontera. La ecuación de balance de cantidad de movimiento implica la consideración de la aceleración local y convectiva así como de fuerzas de presión, gravitacional y de fricción.

En la práctica, la resolución de las ecuaciones completas implica utilizar métodos numéricos. No obstante, para algunos casos se puede simplificar la ecuación de balance de cantidad de movimiento

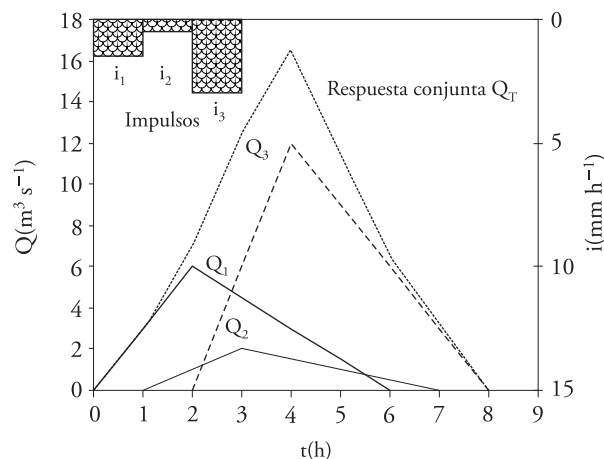


Figura 1. Esquema de impulsos y respuestas: principio de superposición.

Figure 1. Scheme of pulses and responses: principle of superposition.

(Chow *et al.*, 1994): 1) the excess of precipitation is uniformly distributed over the watershed; 2) the duration of response must be constant; 3) the ordinates of the responses are proportional to direct runoff represented by each hydrograph; 4) for each watershed the hydrograph resulting from given excess of rain represents the unchanging features of the watershed.

If the conditions set for a unit impulse, usually defined as excessive rainfall of 1 mm h^{-1} or 1 inch h^{-1} in the original methodology proposed by Sherman (1932), the response function of the watershed is known as Unit Hydrograph (UH). The application of this concept allows analyzing the response of a watershed to precipitations changing over time, by applying an integral of convolution. The concepts of delay time, peak time and actual duration of a unit hydrograph are in Figure 2.

Rain simulators are used in hydrological experimentation to study runoff (Croley and Foster, 1984; Singh *et al.*, 1999; Lima and Singh, 2003). The kinematic wave concept is used to solve problems of one-dimensional movements gradually varied in stream flow (Chow, 1959; Chow *et al.*, 1994). The equations proposed by Barre de Saint-Venant in 1871 constitute a balance of matter and amount of differential scale movement and describe the one-dimensional non permanent flow in an open channel. Starting from these equations any problem of flow would be solved by choosing correctly the conditions of edge or border. The balance equation

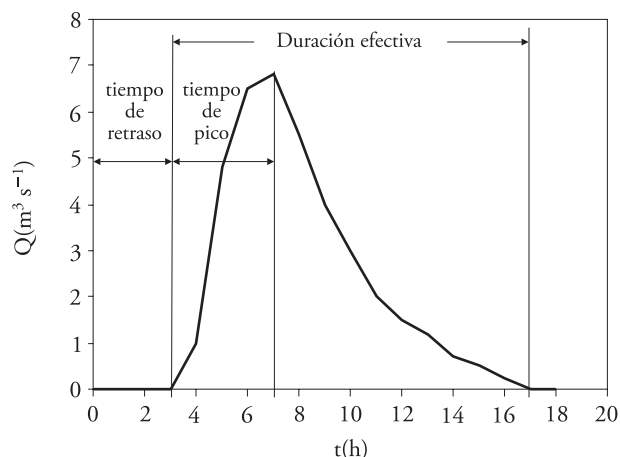


Figura 2. Esquema de un hidrograma unitario.
Figure 2. Scheme of a unit hydrograph.

en alguno de sus términos y la solución final no se modifica gravemente. Así, cuando se desprecian los términos de aceleración pero se consideran las fuerzas de presión, gravitacional y de fricción se habla de un Modelo de Onda de Difusión. Cuando también se desprecian las fuerzas de presión se obtiene el Modelo de Onda Cinemática (Lighthill y Whitham, 1955) que es más simple, y en el cual la ecuación de balance de cantidad de movimiento queda reducida a un equilibrio entre la fuerza gravitacional y la fuerza de fricción, lo que implica suponer que la lámina de agua es significativamente paralela al terreno.

Despreciar los términos inerciales de la ecuación de cantidad de movimiento supone además la posibilidad de considerar una ecuación de flujo uniforme como la de Manning o Chezy (Ponce, 1991) para relacionar el calado con el caudal. Esta operación simplifica notablemente la resolución de la ecuación de balance de volumen, aunque sigue siendo compleja y frecuentemente se resuelve con un método numérico (Chow *et al.*, 1994; Woolhiser *et al.*, 1990). Mediante la aplicación del método de las características (Lighthill y Whitham, 1955), se puede abordar la resolución analítica de la ecuación diferencial parcial de primer orden que queda. Esta solución se ha adoptado para el problema del movimiento del agua procedente de un exceso de precipitación constante (Singh, 1983; Singh y Regl, 1983). Para excesos de precipitación no constante, como ocurre en suelos al inicio del proceso de infiltración, se usa la integración numérica (Woolhiser *et al.*, 1990), y la integración analítica para alguna expresión de infiltración concreta (Giraldez y Woolhiser, 1996). En el caso de

of amount of movement involves consideration of local and convective acceleration as well as pressure, gravitational and friction forces.

In practice, solving the complete equations involves to use numerical methods. However, for some cases the balance equation of movement amount can be simplified in any of its terms and the final solution is not modified seriously. Thus, when the terms of acceleration are neglected but pressure, gravity and friction forces are considered then we talk about a Diffusion Wave Model. When the pressure forces are also neglected the Kinematic Wave Model is obtained (Lighthill and Whitham, 1955) that is simpler, and in which the balance equation of amount of movement is reduced to a balance between gravitational force and the friction force, which implies assume that the water sheet is significantly parallel to the ground.

Neglecting the inertial terms of the equation of movement amount also assumes the possibility to consider a uniform flow equation such as that of Manning or Chezy (Ponce, 1991) to relate the depth to the flow. This operation greatly simplifies the resolution of the equation of volume balance, but remains complex and is often solved by a numerical model (Chow *et al.*, 1994; Woolhiser *et al.*, 1990). By applying the method of characteristics (Lighthill and Whitham, 1955), the analytical resolution of the first-order partial differential equation left can be approached. This solution has been adopted for the problem of water movement from a constant rainfall excess (Singh, 1983; Singh and Regl, 1983). For non-constant rainfall excesses, as in soil at the beginning of the infiltration process, the numerical integration is used (Woolhiser *et al.*, 1990), and the analytical integration for some concrete expression of infiltration (Giraldez and Woolhiser, 1996). In the case of quite impermeable land, with regular form and small area (Ponce, 1991) is advisable to use the simplified kinematic wave theory, so it may be useful in the study of the hydrographs generated by rainfall simulators in micro-plots.

The aim of this study was to develop a method of semi-analytical analysis by applying the kinematic wave theory to the calculation to generate responses to short pulses that can be compound, assuming the principle of superposition, without having to satisfy the remaining conditions imposed to a unit hydrograph. This approach is intended to facilitate the study of the hydrographs generated with a

terrenos bastante impermeables, de forma regular y con superficie pequeña (Ponce, 1991) es aconsejable usar la simplificación de la teoría de la onda cinemática, por lo que puede ser útil en el estudio de los hidrogramas generados mediante simuladores de lluvia en microparcelas.

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un método de análisis semianalítico mediante la aplicación de la teoría de la onda cinemática al cálculo para generar las respuestas a impulsos cortos que puedan ser compuestas, asumiendo el principio de superposición, sin necesidad de cumplir el resto de las condiciones impuestas a un hidrograma unitario. Así se pretende facilitar el estudio de los hidrogramas generados con un simulador de lluvia y recoger de forma sencilla el efecto de la infiltración en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se desarrolló un simulador de lluvia (Figura 3), con 1 m^2 de superficie y una altura de 2 m. El mecanismo de formación de las gotas (1) consiste en un entramado denso de goteros de gasto regulable aunque se ha superpuesto también un marco con microaspersores para formar gotas más finas. Un problema común a este tipo de simuladores es la caída de las gotas siempre en el mismo lugar (Singh *et al.*, 1999) y para prevenirlo se dispuso una malla (2) que cuelga debajo de los emisores y que tiene un marco pesado que oscila durante el proceso. Las mediciones se inician cuando se ha estabilizado la precipitación usando una pantalla móvil (3) que impide que el agua caiga sobre la muestra cuando no se desea; esta pantalla se retira o coloca para dar inicio o fin a una medida. Hay un banco (5) de pendiente variable (α) donde se colocó una bandeja (0.533 m longitud, 0.390 m anchura) con el suelo a utilizar (4). El suelo era limoso, procedente de depósitos de aluvión, con una conductividad hidráulica para la ecuación de Philip de $k=5.69 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, medida mediante infiltrómetro de doble anillo.

La presión de funcionamiento requerida se sitúa en torno a 1 bar para generar intensidades de precipitación similares a las medidas en la zona. La precipitación se mide con 12 pluviómetros colocados en una bandeja idéntica a la que contiene el suelo y colocada encima de la misma. Cuando se ha producido una descarga suficiente se retira la bandeja con los pluviómetros y las gotas empezarán a caer sobre la muestra de suelo. Se toman muestras del caudal generado en el exterior de la muestra a intervalos regulares; cuando las cantidades recogidas son bastante similares se entiende alcanzado el equilibrio, se coloca de nuevo la pantalla y finaliza la precipitación aunque se siguen tomando muestras de caudal para registrar el receso del hidrograma. Este

rainfall simulator and easily pick up the effect of soil infiltration.

MATERIALS AND METHODS

For this study a rainfall simulator (Figure 3) was developed with an area of 1 m^2 and a height of 2 m. The mechanism of formation of drops (1) consists of a dense network of controlled spending emitters although a frame with micro-emitters to form finer droplets has also been overlapped. A common problem in this type of simulators is the fall of drops always in the same place (Singh *et al.*, 1999) and to prevent this, a screen (2) that hangs below the emitters is arranged and it has a heavy oscillating boom during the process. The measurements are initiated when precipitation has been stabilized using a mobile screen (3) that prevents water from dripping onto the sample when not desired; this screen is removed or placed to initiate or end a measurement. There is a bank (5) with a variable slope (α) where a tray (length 0.533 m, 0.390 m width) was placed with the soil to be used (4). Soil was silt, from alluvium deposits, with a hydraulic conductivity for Philip equation of $k=5.69 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, measured by a double-ring infiltrometer.

The operating pressure required is about to 1 bar to generate intensities of rainfall similar to those measured in the area. The

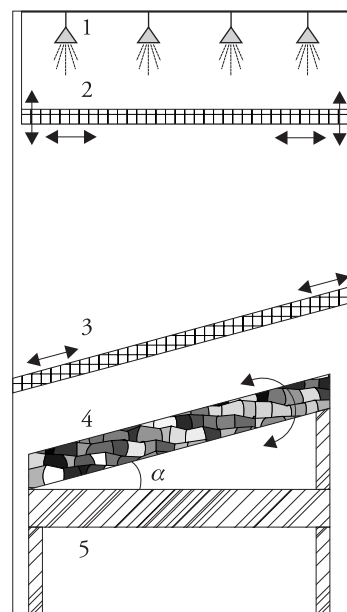


Figura 3. Simulador de lluvia. Emisores (1); malla de dispersión (2); pantalla móvil (3); muestra (4); banco-soporte para muestras de suelo (5) de pendiente variable (α).

Figure 3. Rain simulator. Emitters (1); dispersion mesh (2); mobile screen (3); sample (4); support bank for soil samples (5) of variable slope (α).

ensayo se repitió 16 veces con la misma disposición geométrica pero con diferentes intensidades de lluvia, para obtener los resultados analizados en este estudio.

Para los datos se usa la metodología propuesta por Singh (1983) que permite obtener soluciones analíticas a las ecuaciones de Saint-Venant con la simplificación de la Onda Cinemática, en un plano de pendiente uniforme y bajo un exceso de precipitación constante. En este caso se debe integrar la ecuación 1:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i \quad (1)$$

con $h[L]$ calado; $q[L^2T^{-1}] = \alpha h^a$ caudal específico; $i[L T^{-1}]$ intensidad de exceso de precipitación.

El régimen laminar α se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación 2, con $S_0[-]$ pendiente del suelo, $g[L T^{-2}]$ aceleración de la gravedad, $a[-]$ exponente hidráulico y $f[-]$ factor de fricción:

$$\alpha = \sqrt{\frac{8gS_0}{f}}, a = 3/2 \quad (2)$$

El factor de fricción f depende de la intensidad de precipitación (Chow *et al.*, 1994):

$$f = \frac{C_L}{R_e} \quad (3)$$

Con $C_L[-] = 96 + 108i^{0.4}$, coeficiente de resistencia; $i[L^{-1}T]$ intensidad de la precipitación expresada en pulgadas h^{-1} ; $R_e[-] = 4q_0/\nu$ número de Reynolds; $\nu[L^2T^{-1}]$, viscosidad cinemática.

Para régimen turbulento se usa la ecuación de Manning, ecuación 4, con $n[L^{-1/3}T]$ el factor de aspereza:

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_0}}{n}, a = 5/3 \quad (4)$$

Se usa el método de las características (Courant y Hilbert, 1962), y entonces la ecuación 1, en derivadas parciales, se transforma en dos ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dh}{dt} = i \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = a\alpha h^{a-1} \quad (6)$$

precipitation is measured with 12 pluviometers placed on a tray identical to that containing the soil and placed above it. When there has been a sufficient discharge the tray is removed with the rain gauges and drops will begin to fall on the soil sample. Samples of the generated flow are taken outside the sample at regular intervals; when the amounts collected are quite similar it is understood that the equilibrium is reached, the screen is again placed and the precipitation ends although samples of the flow are still being taken to register the recess of the hydrograph. This trial was repeated 16 times with the same geometric arrangement but with different intensities of rain, to obtain the results analyzed in this study.

For data the methodology proposed by Singh (1983) was used for obtaining analytical solutions to the Saint-Venant equations with the simplification of the kinematic wave, in a uniform slope and under a constant rainfall excess. In this case equation 1 must be integrated:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i \quad (1)$$

with $h[L]$ draft; $q[L^2T^{-1}] = \alpha h^a$ specific flow; $i[L T^{-1}]$ intensity of excess of precipitation.

Laminar regime α is calculated using the Darcy-Weisbach equation, equation 2, with $S_0[-]$ soil slope, $g[L T^{-2}]$ acceleration of gravity, $a[-]$ hydraulic exponent and $f[-]$ friction factor:

$$\alpha = \sqrt{\frac{8gS_0}{f}}, a = 3/2 \quad (2)$$

The friction factor f depends on the intensity of precipitation (Chow *et al.*, 1994):

$$f = \frac{C_L}{R_e} \quad (3)$$

With $C_L[-] = 96 + 108i^{0.4}$, coefficient of resistance; $i[L^{-1}T]$ intensity of the precipitation expressed in inches h^{-1} ; $R_e[-] = 4q_0/\nu$ number of Reynolds; $\nu[L^2T^{-1}]$, kinematic viscosity.

For turbulent flow the Manning equation is used, equation 4, with $n[L^{-1/3}T]$ roughness factor:

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_0}}{n}, a = 5/3 \quad (4)$$

Se pueden integrar ambas ecuaciones con las condiciones de borde: $h=0$ para $[t=0]$, $h=0$ para $[x=0]$, para obtener:

$$h = i \cdot t \quad (7)$$

$$x = \alpha i^{a-1} t^a \quad (8)$$

La ecuación 7 proporciona los calados para cada tiempo, que son válidos en las distancias obtenidas con la ecuación 8. Esta situación se mantiene hasta que se establece un equilibrio entre el agua entrante como lluvia y el agua saliente como escorrentía, momento conocido como tiempo de concentración, t_f . Este tiempo puede calcularse usando la ecuación 8 para $x=L$, longitud del plano. Durante la fase de equilibrio se mantiene el calado y por tanto el caudal hasta que finaliza la precipitación, t_d .

Para la fase de receso, $t > t_d$, se pueden obtener valores del tiempo en función del calado aplicando un balance de cantidad de movimiento para el extremo del plano y obtener:

$$L = \alpha h^{a-1} \left[\frac{h}{i} + a(t - t_d) \right] \quad (9)$$

Cuando $t_d < t_f$, el valor máximo del calado se mantiene hasta un tiempo t_p algo mayor que el tiempo de precipitación y que se puede calcular mediante la ecuación 10. El valor del calado en ese intervalo es marcado por la ecuación 7 para $t=t_d$ y se mantiene hasta $t=t_p$:

$$t_p = t_d + \frac{\left(\frac{L}{\alpha h^{a-1}} \right) - t_d}{a} \quad (10)$$

En este último caso el calado durante la fase de receso también se puede calcular con la ecuación 9.

Esta metodología permite obtener hidrogramas generados por un exceso de precipitación constante en un plano de pendiente constante. En la Figura 4 se muestran hidrogramas generados para duraciones variables, entre 25 y 400 s de exceso de precipitación, para un plano con longitud $L=50$ m, factor de aspereza de Manning $n=0.01$, pendiente $S_0=0.031$ e intensidad de lluvia $i=30$ mm h^{-1} .

La bondad de los ajustes se comprobarán mediante el parámetro índice de ajuste, I_a (Willmot, 1982):

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (x_{i,m} - x_{i,e})^2}{\sum_{i=1}^m (|x_{i,m}| + |x_{i,e}|)^2} \quad (11)$$

The method of the characteristics (Courant and Hilbert, 1962) is used, and then the equation 1, in partial derivatives, is transformed into two ordinary differential equations:

$$\frac{dh}{dt} = i \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \alpha h^{a-1} \quad (6)$$

Both equations can be integrated with the conditions of border: $h=0$ for $[t=0]$, $h=0$ for $[x=0]$, to obtain:

$$h = i \cdot t \quad (7)$$

$$x = \alpha i^{a-1} t^a \quad (8)$$

Equation 7 provides the drafts for each time that are valid in the distances obtained from the equation 8. This situation continues until a balance between inflow as rain and outflow as runoff is established, moment known as concentration time, t_f . This time can be calculated using equation 8 for $x=L$, length of the plane. During the balance phase the draft is maintained and therefore the flow until the end of the precipitation, t_d .

For the phase of recess, $t > t_d$, values of time can be obtained from the time in function of the draft applying a balance of amount of movement for the edge of the plane and obtain:

$$L = \alpha h^{a-1} \left[\frac{h}{i} + a(t - t_d) \right] \quad (9)$$

When $t_d < t_f$, the maximum value of the draft is maintained until a time t_p some higher than the precipitation time and which can be calculated by equation 10. The value of the draft in that interval is marked by equation 7 for $t=t_d$ and is maintained until $t=t_p$:

$$t_p = t_d + \frac{\left(\frac{L}{\alpha h^{a-1}} \right) - t_d}{a} \quad (10)$$

In the latter case the draft during the recess phase can also be calculated with equation 9.

This methodology allows obtaining hydrographs generated by an excess of constant precipitation in a plane of constant slope. In Figure 4 it is shown hydrographs generated for varying durations between 25 and 400 s of excess of precipitation, for a plane with length $L=50$ m, Manning's

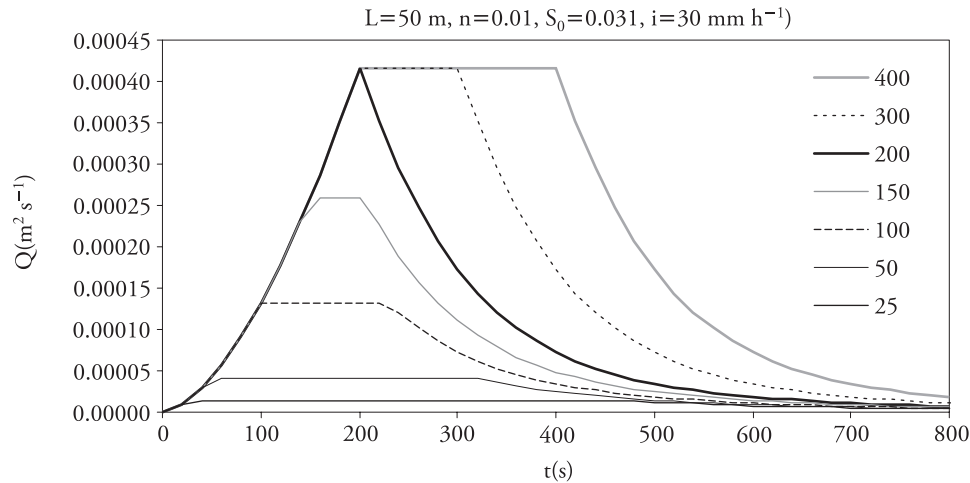


Figura 4. Hidrogramas generados para duraciones de lluvia variables.
Figure 4. Hydrographs generated for variable durations of rain.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 16 hidrogramas con diferentes intensidades de lluvia (Cuadro 1); como ejemplo se muestran dos de ellos en la Figura 5. Las formas de estos hidrogramas son similares a las obtenidas por Croley (1984), y si bien en muchos se percibe el momento en que se produce el tiempo de concentración, t_f , en otros casos esto no es en absoluto claro. No se aprecia bien la fase estable que se deduce del

roughness factor $n=0.01$, slope $S_0=0.031$ and intensity of rain $i=30 \text{ mm h}^{-1}$.

The goodness of adjustments will be checked by the parameter fit index, I_a (Willmot, 1982):

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (x_{i,m} - x_{i,e})^2}{\sum_{i=1}^m (|x_{i,m}| + |x_{i,e}|)^2} \quad (11)$$

Cuadro 1. Índices de ajuste para el tratamiento inicial.
Table 1. Adjustment indices for the initial treatment.

Hidrograma	i (mm h^{-1})	I_a		Parámetros obtenidos por ajuste del método	
		Inicial	Tras el método propuesto	f	R_e
1	151.40	0.916	0.987	28.00	63.25
2	155.66	0.884	0.986	25.00	72.42
3	459.53	0.844	0.976	37.22	154.43
4	242.41	0.824	0.972	32.00	99.25
5	60.00	0.886	0.994	25.11	29.78
6	90.00	0.885	0.988	20.00	44.44
7	40.00	0.784	0.841	14.24	15.78
8	55.00	0.900	0.951	17.60	22.56
9	50.00	0.882	0.992	30.97	17.28
10	105.00	0.914	0.987	19.48	50.08
11	206.72	0.823	0.984	25.52	88.16
12	166.39	0.796	0.995	35.20	48.67
13	146.94	0.834	0.978	35.00	43.99
14	148.78	0.836	0.984	30.00	49.87
15	200.00	0.815	0.996	34.00	64.19
16	600.00	0.870	0.971	25.68	285.85
Media		0.852	0.974		

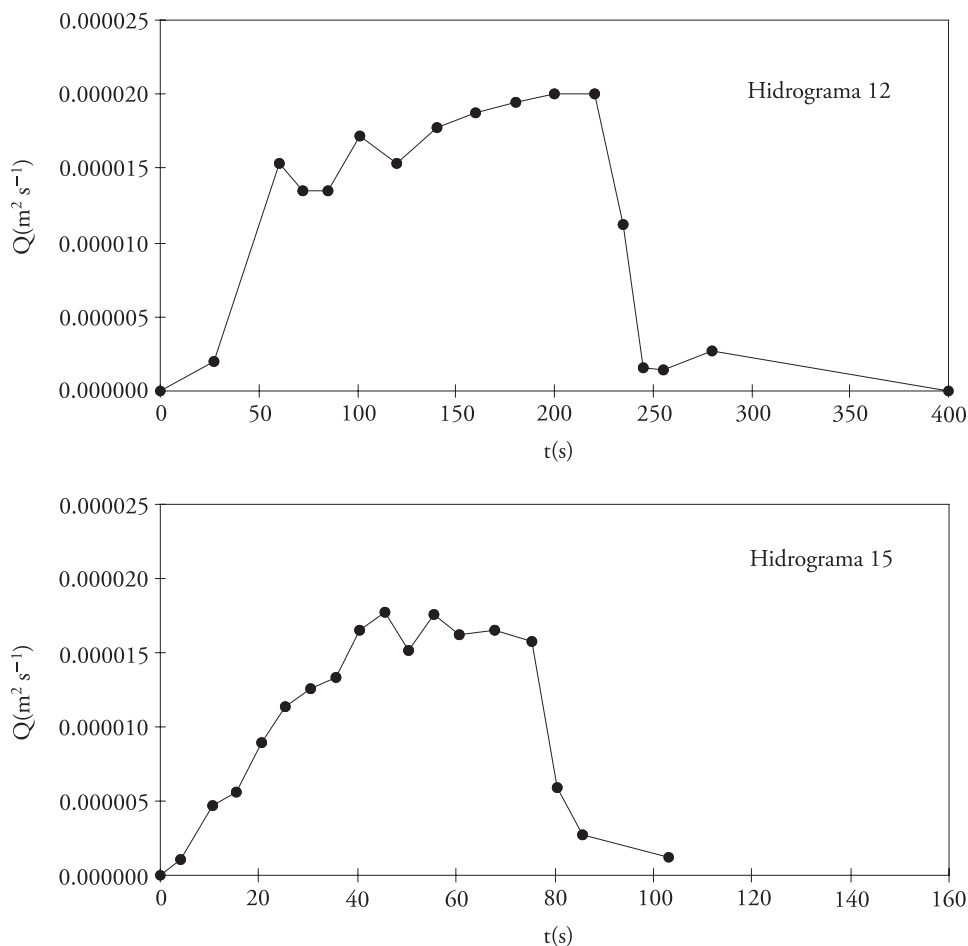


Figura 5. Ejemplos de hidrogramas medidos mediante el simulador de lluvia.
Figure 5. Examples of hydrographs measured by the rainfall simulator.

modelo de Singh (1983). Estos dos aspectos se pueden atribuir al efecto de la infiltración del agua en el suelo, por el cual la intensidad de exceso de lluvia no es constante. No se observa retraso en la aparición de la escorrentía, aunque Croley y Foster (1984) y Lima y Singh (2003) muestran esta circunstancia. Esta situación puede deberse a que el tiempo de encharcamiento es despreciable para las condiciones del ensayo.

Para calcular los coeficientes α y a de las ecuaciones 2 y 4, que a su vez permiten estimar el tiempo de concentración, se preparó un esquema de optimización mediante mínimos cuadrados y usando la rutina de aproximación Solver en la hoja de cálculo Excel. Los datos de entrada fueron las dimensiones geométricas de la muestra, intensidad de precipitación, permeabilidad del suelo y duración de la lluvia. Con estos datos se generó un hidrograma estimado que se

RESULTS AND DISCUSSION

16 hydrographs with different rainfall intensities were obtained (Table 1); as examples two of them are shown in Figure 5. The shapes of these hydrographs are similar to those obtained by Croley (1984), and although in many of them it is perceived the moment in which the concentration time, t_f , is produced, in other cases this is not at all clear. It is not well appreciated the stable phase which follows the model of Singh (1983). These two aspects can be attributed to the effect of water infiltration in the soil, for which the intensity of excess rainfall is not constant. A delay in the onset of runoff is not observed, although Croley and Foster (1984) and Lima and Singh (2003) show that fact. This situation can be due to the time of flooding being negligible for the trial conditions.

comparaba con el hidrograma medido. Los parámetros de ajuste fueron el factor de fricción f o el factor de aspereza de la ecuación de Manning, n , según el régimen hidráulico medio del ensayo y la humedad inicial del suelo. Los valores del índice de ajuste, I_a , obtenidos para los mejores ajustes se muestran en el Cuadro 1.

Propuesta de método

El método original propuesto por Singh (1983) implica la aparición de un caudal estable una vez rebasado el tiempo de concentración, por lo que los ensayos se programaron para alcanzar esta fase de equilibrio. Los tiempos usados fueron siempre muy reducidos dadas las dimensiones de las muestras y las intensidades de lluvia alcanzadas.

Para mejorar los ajustes se propone descomponer la duración total de la lluvia en varios intervalos lo bastante cortos como para considerar que el exceso de precipitación en cada uno de ellos se pueda considerar constante. En cada intervalo la capacidad de infiltración del suelo es tomada en cuenta para deducir el exceso de precipitación que corresponde aplicar. Se considera que cada impulso de exceso de precipitación genera una respuesta que se puede superponer con las restantes para obtener un hidrograma combinado. Como cada impulso se desarrolla en un intervalo de tiempo diferente de los anteriores, las respuestas también se aplicarán con idéntico desfase (Figura 6).

To calculate the coefficients α and a of the equations 2 and 4, which in turn allow to estimate the time of concentration, a scheme for optimization was prepared by least squares and by using the routine of approximation Solver in the Excel calculus spreadsheet. The input data were the geometric dimensions of the sample, intensity of precipitation, permeability of soil and duration of rainfall. With these data an estimated hydrograph was generated which was compared to the measured hydrograph. The adjustment parameters were the friction factor f or the roughness factor of Manning's equation, n , according to the average hydraulic system of the trial and the initial soil moisture. The values of the adjustment index, I_a , obtained for the best adjustments are shown in Table 1.

Proposal of method

The original method proposed by Singh (1983) implies the emergence of a stable flow once the time of concentration is exceeded, so that trials were scheduled to reach this stage of balance. The times used were always very small given the size of the samples and the rainfall intensities reached.

In order to improve the adjustments it is proposed to decompose the total duration of rainfall at various intervals short enough as to consider that the excess of precipitation in each one of them can be considered constant. At each interval the capacity of soil infiltration is taken into account to derive the

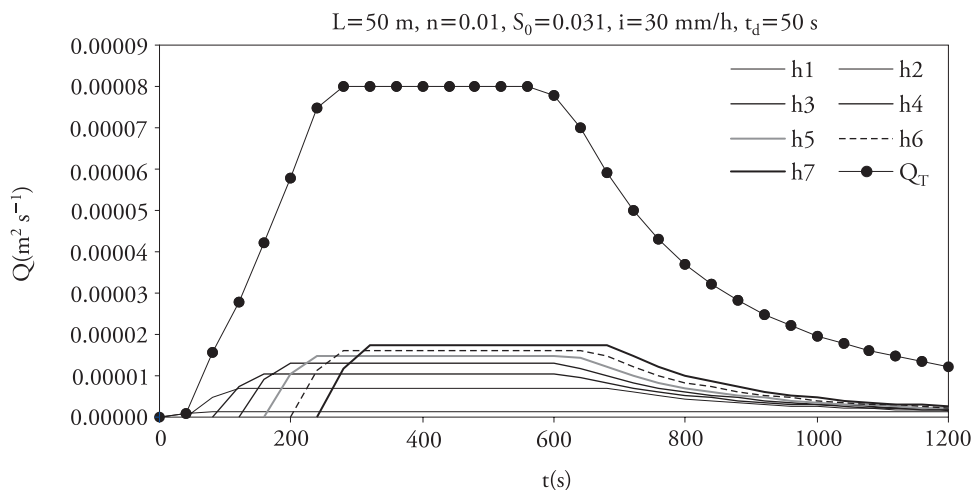


Figura 6. Ejemplo de combinación de hidrogramas h_i , $i=1, \dots, 7$, para obtener una respuesta única Q_T (hidrograma combinado).
Figure 6. Example of combination of hydrographs h_i , $i=1, \dots, 7$, to obtain a single response Q_T (combined hydrograph).

Se usa la ecuación de infiltración de Philip, ecuación 12, para generar los excesos de precipitación en cada intervalo. Dadas las intensidades de precipitación usadas, el tiempo de encharcamiento y por tanto el retraso en la aparición de exceso de lluvia, es despreciable, lo cual queda corroborado en los hidrogramas medidos, donde no se observa retraso en la respuesta.

$$f = \frac{A_b}{2\sqrt{t}} + k \quad (12)$$

con $f[LT^{-1}]$ velocidad de infiltración, $k[LT^{-1}]$ permeabilidad, $A_b[LT^{-1/2}]$ absortividad.

Cada impulso generado tiene un tiempo de inicio relacionado con el del impulso al que responde, pero su duración es indeterminada de acuerdo con lo previsto en las ecuaciones correspondientes.

En este caso el esquema de optimización actúa sobre dos parámetros del modelo: 1) si el régimen hidráulico es turbulento, se trabaja sobre el factor de aspereza de Manning, n de la ecuación 4; 2) si el régimen hidráulico es laminar se actúa sobre el factor de fricción, f de la ecuación 2, y en ambos casos se ajusta la absortividad, A_b , de la ecuación 12.

Al aplicar la metodología propuesta a los hidrogramas medidos se muestra que en todos los casos el régimen hidráulico fue laminar ya que el número de Reynolds fue siempre inferior a 2000 (Cuadro 1). Los factores de fricción, obtenidos mediante el mismo esquema de optimización comentado, oscilaron entre 14 y 38 que son valores relativamente normales. Los nuevos índices de ajuste (Cuadro 1) mejoran a los obtenidos inicialmente.

Como ejemplo, en la Figura 7 se presentan los resultados de la metodología propuesta para los mismos hidrogramas de la Figura 5, donde se observa que el método propuesto (línea continua) predice adecuadamente las medidas realizadas.

Se calculan de nuevo los parámetros de la ecuación 3 para adaptarla a las condiciones del simulador de lluvia utilizado y para expresar la intensidad de lluvia i (mm h^{-1}). En estas condiciones el coeficiente de resistencia queda como $C_L = 96 + 207.95i^{1.13}$.

En la Figura 8 se muestra la relación entre los valores de C_L calculados (C_{Lm}) a partir de los ensayos y los valores estimados con la nueva expresión de C_L , (C_{Le}). Al realizar un análisis de regresión se

rainfall excess to be applied. It is considered that each pulse of excess precipitation generates a response that may overlap with the others to obtain a combined hydrograph. As each pulse is developed in a different time interval of the previous ones, the responses will be also applied with equal gap (Figure 6).

The Philip infiltration equation, equation 12, is used to generate the excess of precipitation at each interval. Given the rainfall intensities used, the time of puddles formation and therefore the delay in the appearance of rainfall excess is negligible, which is corroborated in the measured hydrographs, where a delay in response is not observed.

$$f = \frac{A_b}{2\sqrt{t}} + k \quad (12)$$

with $f[LT^{-1}]$ infiltration velocity of, $k[LT^{-1}]$ permeability, $A_b[LT^{-1/2}]$ sorptivity.

Each pulse generated has a start time related to that pulse to which it responds, but its duration is undetermined in accordance to what was previewed in the corresponding equations.

In this case the optimization scheme operates on two parameters of the model: 1) if the hydraulic system is turbulent, one works on the Manning's roughness factor, n of equation 4; 2) if the hydraulic regime is laminar one works on the friction factor, f of the equation 2, and in both cases sorptivity, A_b , of equation 12 is adjusted.

By applying the proposed methodology to the measured hydrographs it is shown that in all cases the hydraulic regime was laminar as the Reynolds number was always less than 2000 (Table 1). Friction factors, obtained by the same optimization scheme discussed, ranged between 14 and 38 which are relatively normal values. The new adjustment indices (Table 1) improve those obtained initially.

As an example, Figure 7 shows the results of the proposed methodology for the same hydrographs in Figure 5, and it is observed that the proposed method (solid line) predicts the measurements properly.

The parameters of equation 3 are again calculated to adapt it to conditions of the rainfall simulator and to express the rainfall intensity i (mm h^{-1}). Under these conditions the coefficient of resistance remains $C_L = 96 + 207.95i^{1.13}$.

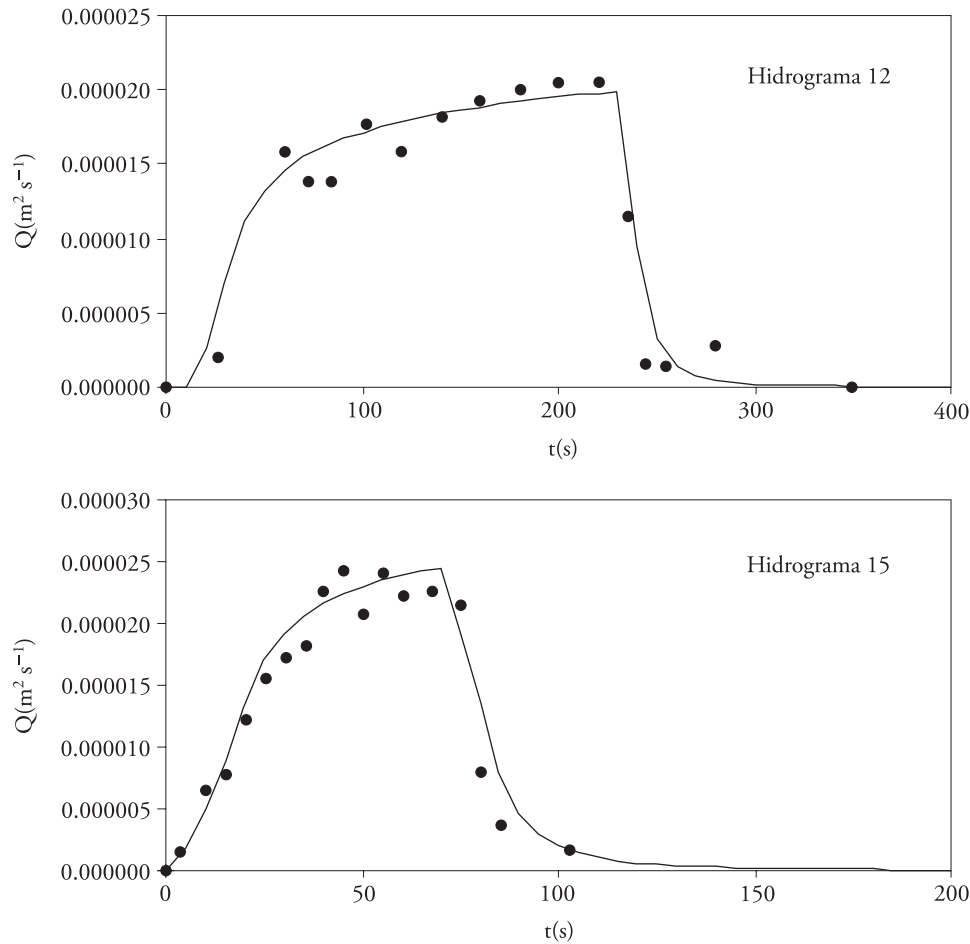


Figura 7. Ejemplos de hidrogramas medido (●) y estimado con el método propuesto (—).
Figure 7. Examples of hydrographs measured (●) and estimated with the proposed method (—).

puede ajustar a una recta de pendiente 0.997 con un $R^2=0.99$. Esta actualización de C_L permite estimar su valor para otros casos sin necesidad de ajustar nuevamente el modelo.

CONCLUSIONES

El método original no funciona bien para estudiar los hidrogramas generados mediante simulador de lluvia y cuando el suelo presenta una capacidad de infiltración alta. Se propuso un método basado en la teoría de la onda cinemática que incorpora el efecto de la infiltración del agua en el suelo, mediante la generación de respuestas a impulsos cortos que puedan ser compuestas asumiendo el principio de superposición.

Se muestra la influencia de la intensidad de la precipitación sobre el factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach para suelos permeables y se propone

The relationship between the calculated values of C_L (C_{Lm}) from the trials and estimated values with the new expression of C_L , (C_{Le}) is shown in Figure 8. When performing a regression analysis, it can adjust to a line of 0.997 slope with an $R^2=0.99$. This update of C_L allows estimating its value for other cases without needing a new adjustment of the model.

CONCLUSIONS

The original method does not function well to study the hydrographs generated by the rainfall simulator and when the soil has a high infiltration capacity. A method based on the kinematic wave theory was proposed which incorporates the effect of water infiltration into the soil, through the generation of responses to short pulses which can be made assuming the principle of superposition.

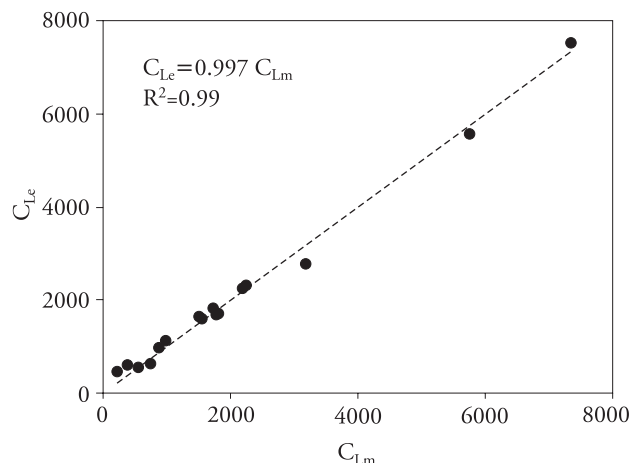


Figura 8. Relación entre C_L estimado (C_{Lc}) y C_L medido (C_{Lm}) y recta de regresión lineal.

Figure 8. Relationship between C_L estimated (C_{Lc}) and C_L measured (C_{Lm}) and a simple linear regression.

una actualización de los parámetros de la ecuación, para su utilización en simuladores de lluvia.

LITERATURA CITADA

- Chow, V. T. 1959. Open-channel Hydraulics, Ed. McGraw-Hill, New York. 667 p.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, y L. W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá. 584 p.
- Courant, R., and D. Hilbert. 1962. Methods of Mathematical Physics, V2. Ed. Willey-Interscience, NY. 830 p.
- Croley, T. E., and G. R. Foster. 1984. Unsteady sedimentation in nonuniform rills. J. Hydrol. 70: 101-122.
- Giráldez, J. V., and D. A. Woolhiser. 1996. Analytical integration of the kinematic equation for runoff on a plane under constant rainfall rate and Smith-Parlange infiltration. Water Resources Res. 32(11): 3885-3890.
- Lima, J. L. M. P., and V. P. Singh. 2003. Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. Physics and Chem. of the Earth 20: 277-282.
- Lighthill, M. J., and G. B. Whitham. 1955. On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers. Proc. Royal Soc. London. Series A, 229(1178): 281-316.
- Ponce, V. M. 1991. The kinematic wave controversy. J. Hydraulic Eng. 117(4): 511-525.
- Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Eng. News Record 108: 501-505.
- Sing, V. P. 1983. Analytical solutions of Kinematic equations for erosion on a plane. II Rainfall of finite duration. Adv. Water Resources. 6: 88-95.
- Singh, R., N. Panigrahy, and G. Philip. 1999. Modified rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. Agric. Water Manage. 41: 167-175.
- Singh, V. P., and R. R. Regl. 1983. Analytical solutions of Kinematic equations for erosion on a plane. I Rainfall of indefinite duration. Adv. Water Resources. 6: 2-10.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63: 1309-1313.
- Woolhiser D. A., D. C. Smith, D. C. Goodrich, and A. Kinos. 1990. Kinematic Runoff and Erosion Model: U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Documentation and User Manual. ARS-77. 130 p.

It is shown the influence of the precipitation intensity on the friction factor of the Darcy-Weisbach equation for permeable soils and an update of the equation parameters is proposed for its use in rainfall simulators.

—End of the English version—

