

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO EN LA TRANSFERENCIA DE SOLUTOS DEL SUELO AL FLUJO DE ESCORRENTÍA

F.M. Domínguez¹, A. Jurado¹, M.J. Polo¹

¹ Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales – Edif. Leonardo da Vinci 14071 Córdoba, um2doluf@uco.es

RESUMEN. La transferencia de solutos desde el suelo a la escorrentía es un proceso afectado por diferentes factores. Cuando la escorrentía se produce por inundación súbita la contribución al proceso de transferencia del tiempo de encharcamiento puede llegar a ser despreciable. Esto ocurre en situaciones de inundación súbita en un suelo con textura franca. Como han demostrado trabajos previos, este proceso puede describirse mediante una función de carga exponencial decreciente con parámetros relacionados con las condiciones hidráulicas del flujo superficial. Sin embargo, cuando el suelo tiene texturas gruesas el tiempo de encharcamiento no siempre es despreciable y su valor puede condicionar la dinámica de transferencia de forma significativa. Este trabajo muestra la influencia del tiempo de encharcamiento en la dinámica de transferencia de solutos a la escorrentía, a partir de ensayos experimentales en canal hidráulico bajo condiciones controladas. En estos ensayos se estudiaron los efectos sobre la dinámica de transporte una vez que la escorrentía comienza a generarse en un suelo arenoso, donde se situó un trazador en una franja del canal, bajo diferentes valores del caudal en cabecera.

A partir de las medidas experimentales en el flujo superficial y los cálculos de evolución del flujo de agua obtenidos mediante un modelo numérico 1D de tercer orden, que incorpora la ecuación de Green y Ampt como función de infiltración, se estimó la evolución de la carga de trazador transferida desde el suelo a la escorrentía en cada ensayo. Los resultados muestran una evolución temporal de la función de carga cuya forma depende del orden de magnitud del tiempo de encharcamiento, en la franja donde se sitúa el trazador. Esta función se define con parámetros que se relacionan no ya sólo con las condiciones del flujo superficial, como en el caso de suelos con texturas más finas, sino también con la capacidad de infiltración y el retardo en la generación de escorrentía.

ABSTRACT. Solute transfer from soil to runoff is a process affected by various factors. When runoff is generated by sudden flood sometimes ponding time contribution to the transfer process is negligible. This occurs when suddenly a loamy soil is flooded. As demonstrated by previous work, this process can be described by a decreasing exponential load function with parameters related to the overland flow hydraulic conditions. When soil is coarse textured ponding time is not always negligible and its value can influence transfer dynamics significantly. This work shows ponding time influence in the solute transfer to runoff dynamics from

experimental tests under controlled conditions in hydraulic channel. The effects on the transport dynamics once runoff starts in sandy soil were studied, where a tracer on a fringe of the channel was placed, under different flow rates.

From experimental measures in the surface flow and the changes in water flow calculations through a 1D numerical model that incorporates the Green and Ampt third-order equation infiltration function, the tracer load evolution transferred from soil to runoff in each trial were estimated. The results show a temporal load function evolution whose shape depends on the ponding time order of magnitude on the strip where the tracer is located. This function is defined with parameters that are associated not only with surface flow conditions, as in the case of soils with finer textures, but also with the infiltration and the delay in runoff generation.

1.- Introducción

El aporte de sustancias contaminantes desde el suelo al flujo de escorrentía superficial se produce por transferencia de solutos. Este complejo proceso es regido principalmente por la infiltración y la generación de escorrentía, que se determinan por la interacción de las características del suelo y las condiciones del flujo, así como por las características de la transferencia de sustancias desde la matriz porosa del suelo. Posteriormente, una vez el soluto se encuentra en el flujo superficial, el proceso se rige principalmente por los transportes advectivo y difusivo, también determinados por las características y condiciones citadas.

El flujo de agua superficial que recibe los contaminantes de la capa superficial de suelo se puede producir por saturación del suelo por ocurrencia de precipitación; y sobre este tema se pueden consultar diversos trabajos como los de Ahuja y Lehman (1983), Wallach et al. (1989), Zhang et al. (1997), Gao et al. (2005), Galindo et al. (2006), Walter et al. (2007), entre otros. Por otro lado, este proceso también se puede producir por inundación súbita del suelo, muy común en cuencas mediterráneas. Esta fue la línea de investigación de los estudios de Nofuentes et al. (2006), y Nofuentes y Polo (2008), con trabajos de laboratorio que se realizaron en canal hidráulico. La transferencia de solutos desde el suelo se modeló a escala macroscópica como una función de carga de tipo exponencial similar a la utilizada, por

ejemplo, por Chapra (1997), para modelar vertidos de contaminantes directos a sistemas acuáticos, cuyos parámetros se relacionaron significativamente con la velocidad del flujo superficial de agua.

En el proceso de transferencia de solutos, tanto en el flujo superficial como en el de infiltración, juega un papel muy importante la capacidad del suelo para retener y transmitir el agua a su través. Por un lado, los suelos de textura fina son más impermeables, esto permite la generación de escorrentía de forma más temprana y en mayor cantidad, aumentando de esta forma la concentración inicial de contaminantes solubles en el flujo superficial de agua.

Galindo et al. (2006) comprobaron en sus ensayos que el sellado del suelo y su compactación influyen en la transferencia de solutos al flujo de escorrentía disminuyendo la velocidad de infiltración y el tiempo de inicio de la escorrentía. De esta forma, a menor tiempo de encharcamiento mayor concentración de compuestos solubles en el flujo de agua.

Con el fin de determinar la importancia de la influencia del tiempo de encharcamiento en el proceso de transferencia de solutos del suelo al flujo de escorrentía generada por inundación súbita, a partir de la experiencia previa de los trabajos de Nofuentes y Polo (2008) en un suelo con textura franca, se diseñaron una serie de ensayos de transferencia en suelo con textura arenosa. En estos ensayos se analizó el proceso en un suelo con textura más gruesa, donde el tiempo de encharcamiento es mucho mayor, y se compararon con los resultados obtenidos anteriormente en un suelo menos permeable. Este trabajo muestra los resultados obtenidos bajo dichas condiciones para la función de carga resultante y su análisis.

2.- Materiales y métodos

2.1.- Diseño experimental

Los ensayos de transferencia de solutos estudiados se desarrollaron en canal hidráulico sobre un suelo arenoso. Los resultados experimentales se utilizaron como base para la obtención de funciones de carga específicas, a partir de los cálculos del flujo de agua mediante el modelo numérico 1D de tercer orden de Nofuentes et al. (2011), que integra las ecuaciones de aguas someras acoplado a una formulación del proceso de infiltración con base física (Nofuentes y Polo, 2009).

Estos ensayos se realizaron en un tramo recto de canal hidráulico, de 9 metros de longitud, donde se emplazó un suelo con textura arenosa y en el que se dispuso, en cada ensayo, una franja de trazador (KBr), véase Fig. 1. Los ensayos se realizaron para valores generadores de caudal en cabecera que variaron en el intervalo de $6.42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a $10.26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

El canal hidráulico usado fue de sección transversal y pendientes constantes, con 9 metros de longitud, 1 metro de anchura y 1 metro de altura. Para la adecuada disposición del suelo en el canal, se realizó una cámara hueca con ladrillos cerámicos de 1 metro de longitud, 0.4 metros de ancho y 0.05 metros de alto. La altura de la cámara fue la

suficiente para no ser inundada por completo con el caudal infiltrado, coincidente con el diámetro de las salidas inferiores del canal. Sobre los ladrillos cerámicos se colocó papel filtro para evitar la pérdida de finos del suelo por lavado. Inmediatamente superior al papel filtro se emplazó un lecho de 0.02 metros de grava de machaqueo. Sobre esta capa se colocó tela mosquitera que sirvió de soporte a una segunda capa de papel de filtro, con el mismo cometido que la primera. Por último, sobre el papel de filtro, se emplazó el suelo en un perfil homogéneo de 0.15 metros de altura y una pendiente constante del 0.2 %.

En la preparación de los ensayos se colocó en el canal una franja de suelo con un 81.5% de trazador, a 4 metros de cabecera y de 0.05 metros de ancho. Antes de hacer circular el caudal de agua deseado por el canal, se colocaron conductímetros en las secciones donde se controla la concentración del trazador. Para esto se marcaron los aparatos numerándolos del uno al seis y se emplazaron de la siguiente forma:

- CE1 y CE2: 0.04 metros antes de la franja cargada con KBr, para estimar la influencia de la dispersión aguas arriba.
- CE3, CE4 y CE5: 0.04 metros después de la franja cargada con KBr.
- CE6: 1.95 metros después de la franja, en la sección sexta, a 6 metros de la cabecera. Los datos registrados en esta sección se usarán en trabajos posteriores donde se estudiará el proceso de transporte de los solutos en el seno del flujo de escorrentía.



Fig. 1. Vista aguas abajo del canal hidráulico. Colocación de los conductímetros.

Para estos ensayos se hicieron circular, por el canal, flujos de escorrentía generados por cinco caudales distintos en cabecera: $6.42 \cdot 10^{-3}$, $7.85 \cdot 10^{-3}$, $8.15 \cdot 10^{-3}$, $8.80 \cdot 10^{-3}$ y $10.26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores se corresponden con velocidades en régimen permanente del flujo de escorrentía, en la sección marcada con trazador, comparables a las medidas en los ensayos previos en suelo menos permeable (Nofuentes et al., 2006).

En esta ocasión el tipo de suelo utilizado fue arenoso, según la clasificación USDA, con 95% de arena y 5% de limo y arcilla. El método usado para su caracterización fue el método de Bouyoucos por dar resultados similares al de la pipeta, pero sin necesidad de pretratar las muestras y sin requerir largos periodos de reposo.

2.2.- Modelo de flujo de agua

Para el modelado del flujo de agua, se ha utilizado el modelo 1D descrito por Nofuentes et al. (2011), para el transporte de solutos en flujos someros sobre medio poroso. Este modelo utiliza las ecuaciones de Saint Venant y la ecuación de infiltración de Green y Ampt para calcular la evolución de los flujos de agua, utilizando un esquema conservativo de volúmenes finitos de tercer orden a partir de Castro et al. (2006), basado en la reconstrucción WENO de tercer orden propuesta por Dumbser et al. (2008), que proporciona polinomios completos en lugar de valores puntuales en el proceso de reconstrucción en contraste con la aproximación original 4 WENI de Jiang y Shu (1996) utilizada en Castro et al. (2006).

2.3.- Modelo de transferencia de solutos al flujo de escorrentía superficial.

En cuanto al modelado de la transferencia de solutos se utilizaron las medidas de conductividad tomadas por los conductímetros CE3, CE4 y CE5, ya que las medidas obtenidas en los conductímetros aguas arriba arrojaron valores no significativos de presencia de soluto. Estas medidas se transformaron en valores de concentración de trazador utilizando las curvas de calibración obtenidas previamente con soluciones patrón para cada conductímetro y ensayo, y sus resultados se usaron para ajustar los parámetros de las funciones de carga propuestas en este trabajo para describir la transferencia de soluto del suelo al flujo superficial a la vista de los resultados experimentales.

Se utilizaron tres expresiones para la función de carga:

$$W = W_0 \cdot e^{-\beta \cdot t_{op}} \tag{1}$$

donde W_0 es la carga de masa de soluto al inicio de la transferencia, β es un coeficiente de transferencia y t_{op} es el tiempo de oportunidad, el lapso de tiempo ocurrido desde el instante en que el frente de agua llega a la franja marcada con trazador hasta el instante en que se evalúa la carga;

$$W = W_a (e^{-\beta \cdot t_{op}} - e^{-\lambda \cdot t_{op}}) \tag{2}$$

donde W_a es el término de carga de masa, β y λ son coeficientes de transferencia, y t_{op} es el tiempo de oportunidad. Por último

$$W = \frac{W_a}{\sqrt{t_{op}}} e^{-\beta \cdot t_{op}} \tag{3}$$

donde w_a es el término de carga de masa; β es el coeficiente de transferencia; y t_{op} el tiempo de oportunidad.

Las ecuaciones (2) y (3) permiten caracterizar un retardo del valor máximo de carga, resultado del transporte inicial en el perfil de suelo durante el tiempo de encharcamiento.

3.- Resultados

Las medidas tomadas en los ensayos fueron de dos tipos, medidas referentes al flujo de agua y medidas referentes a la conductividad en el flujo, directamente relacionadas con la concentración de soluto. En cuanto a las primeras medidas se pueden observar a continuación, en la Fig. 2, las curvas

de avance del agua que se registraron para tres de los cinco ensayos, la tendencia en el resto de los ensayos fue la misma.

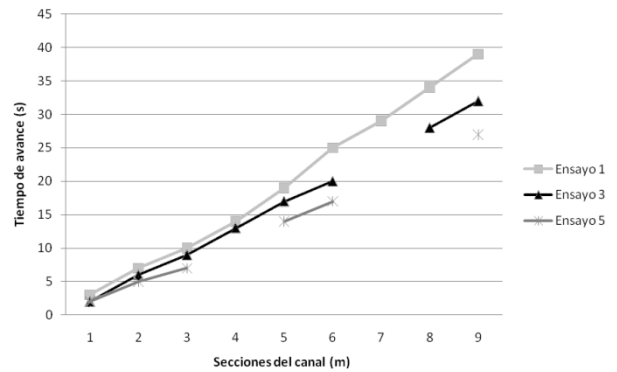


Fig. 2. Curvas de avance del frente de agua.

En la siguiente tabla se muestran, para cada valor de caudal en cabecera, Q_0 , los valores utilizados de los parámetros de la ecuación de infiltración de Green y Ampt, la conductividad hidráulica en saturación y el potencial matricial en el frente húmedo, k_s y ψ_m , respectivamente; el incremento entre humedad inicial y humedad saturada, $\Delta\theta$, y el coeficiente de rugosidad de Manning, n . En el proceso de cálculo, k_s y n son parámetros de calibración, $\Delta\theta$ se calcula a partir de las medidas antes y después de cada ensayo, y ψ_m se adopta fijo para todos los casos y se comprueba posteriormente a la luz de las simulaciones.

Tabla 1. Valores ajustados de los parámetros de infiltración, conductividad hidráulica en saturación, coeficiente de Manning e incremento de humedad

Ensayo	Q_0 (m ³ /s)	k_s (m/s)	ψ_m (m)	$\Delta\theta$	n (S.I.)
1	$6.42 \cdot 10^{-3}$	0.015	-0.3	0.45	0.025
2	$7.85 \cdot 10^{-3}$	0.015	-0.3	0.45	0.025
3	$8.15 \cdot 10^{-3}$	0.015	-0.3	0.45	0.025
4	$8.80 \cdot 10^{-3}$	0.015	-0.3	0.45	0.025
5	$10.26 \cdot 10^{-3}$	0.015	-0.3	0.45	0.025

Las razón por la que los valores de k_s y n son idénticos, para cada ensayo, ha sido la menor capacidad de compactación del tipo de suelo ensayado, con respecto a suelos con otras texturas. El valor de ψ_m , tomado de Rawls et al. (1983), se ha mantenido constante a la vista de los resultados obtenidos durante la calibración.

Seguidamente, en la tabla 2, se observan los valores de las variables que definen el flujo de agua superficial en cada ensayo realizado. Q_0 es el valor del caudal generador del flujo, en cabecera del canal; Q_s y Q_t son el caudal de salida y el caudal en la franja donde se sitúa el trazador, medidos al alcanzarse el régimen permanente; Im_p es la infiltración media al alcanzarse el régimen permanente; t_{av} es el tiempo tiempo de avance en la sección marcada con

trazador; y t_e es el tiempo de encharcamiento.

Tabla 2. Variables que definen el flujo de agua.

Ensayo	Q_0 (m ³ /s)	Q_s (m ³ /s)	Q_d (m ³ /s)	Im_p (m/s)	t_c (s)	t_{av} 4(s)
1	$6.42 \cdot 10^{-3}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$0.32 \cdot 10^{-3}$	6.15	14
2	$7.85 \cdot 10^{-3}$	$4.68 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$0.35 \cdot 10^{-3}$	5.40	13
3	$8.15 \cdot 10^{-3}$	$4.75 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$0.38 \cdot 10^{-3}$	5.39	12
4	$8.80 \cdot 10^{-3}$	$5.57 \cdot 10^{-3}$	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$0.36 \cdot 10^{-3}$	4.95	12
5	$10.26 \cdot 10^{-3}$	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$8.7 \cdot 10^{-3}$	$0.34 \cdot 10^{-3}$	4.62	11

Los valores de concentración de soluto al final de la franja marcada con trazador, y los valores de la evolución del caudal con respecto al tiempo de oportunidad, obtenidos del modelo 1D, se pueden observar en las Fig. 3 y 4. En cada ensayo, la evolución de la concentración decrece con el tiempo y el caudal crece hasta alcanzar el régimen permanente.

Seguidamente, en la Fig. 5, se muestra la evolución de la carga de soluto en la sección donde se localizó el trazador en el suelo, calculada a partir de las medidas de concentración y los valores de caudal calculados, para cada instante en el que se registra medida, en cada uno de los cinco ensayos. Además se muestra la forma de las tres funciones estudiadas.

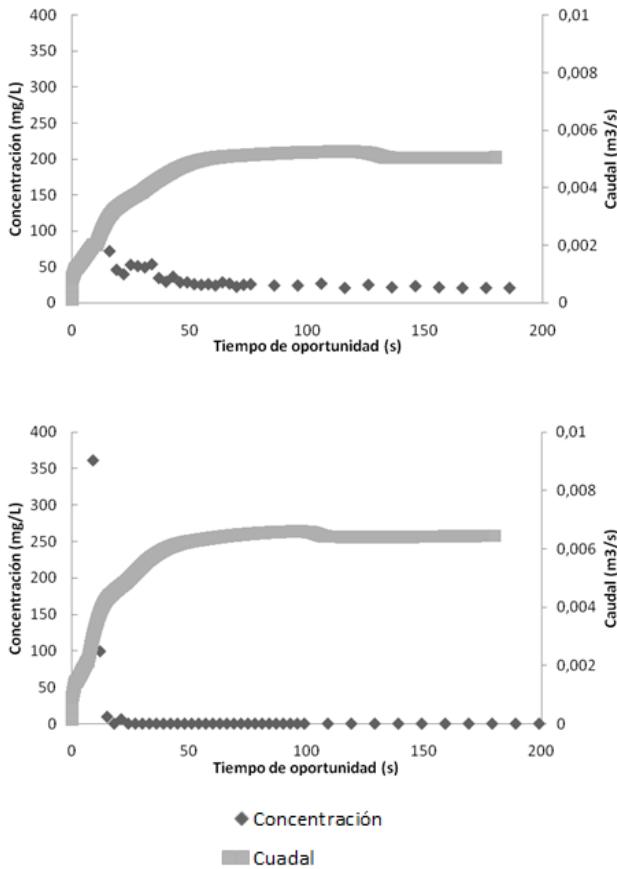


Fig. 3. Evolución temporal de la concentración de soluto y el caudal tras la sección donde se situó el trazador en los ensayos más lentos (Ensayos 1 y 2).

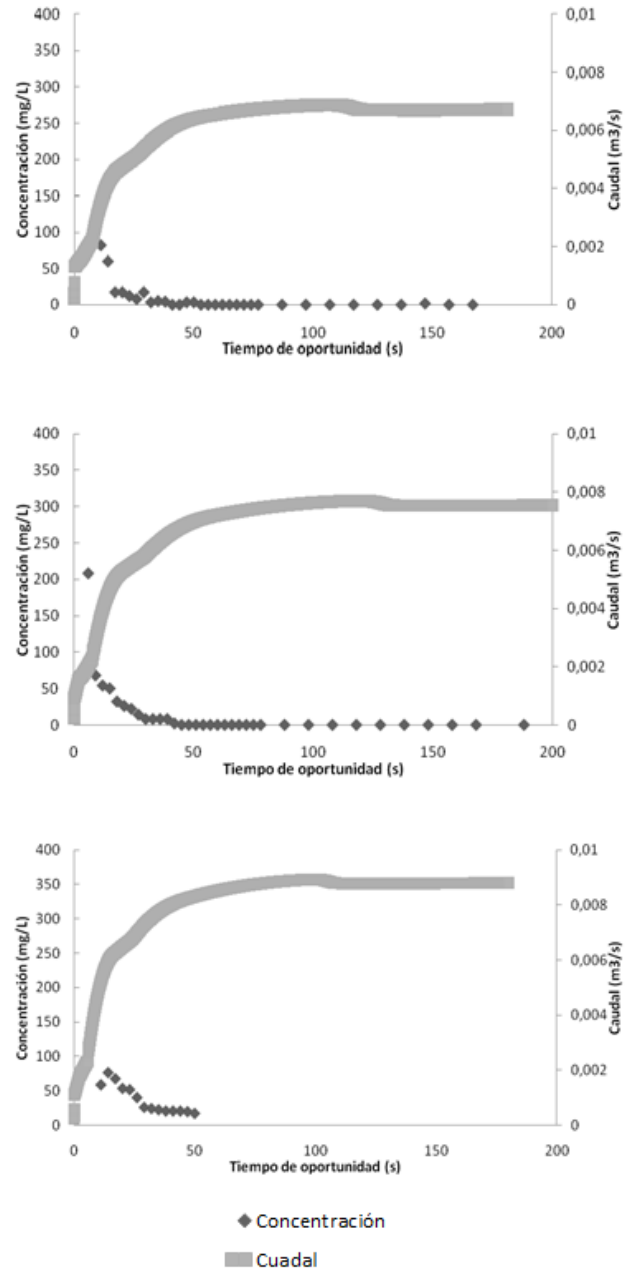


Fig. 4. Evolución temporal de la concentración de soluto y el caudal tras la sección donde se situó el trazador en los ensayos más rápidos (Ensayos 3, 4 y 5).

A continuación se muestran los valores de los parámetros ajustados a las medidas de carga obtenidas, según las funciones estudiadas (1), (2) y (3).

Tabla 3. Parámetros de la función de carga (1) ajustada a los cinco ensayos y coeficientes de ajuste.

Q_0 (m ³ /s)	W_0 (kg/s)	β (s ⁻¹)	R^2
$6.42 \cdot 10^{-3}$	$0.204 \cdot 10^{-3}$	0.004	0.625
$7.85 \cdot 10^{-3}$	$37.220 \cdot 10^{-3}$	0.393	0.994
$8.15 \cdot 10^{-3}$	$1.091 \cdot 10^{-3}$	0.120	0.919
$8.80 \cdot 10^{-3}$	$0.578 \cdot 10^{-3}$	0.074	0.920
$10.26 \cdot 10^{-3}$	$0.725 \cdot 10^{-3}$	0.034	0.984

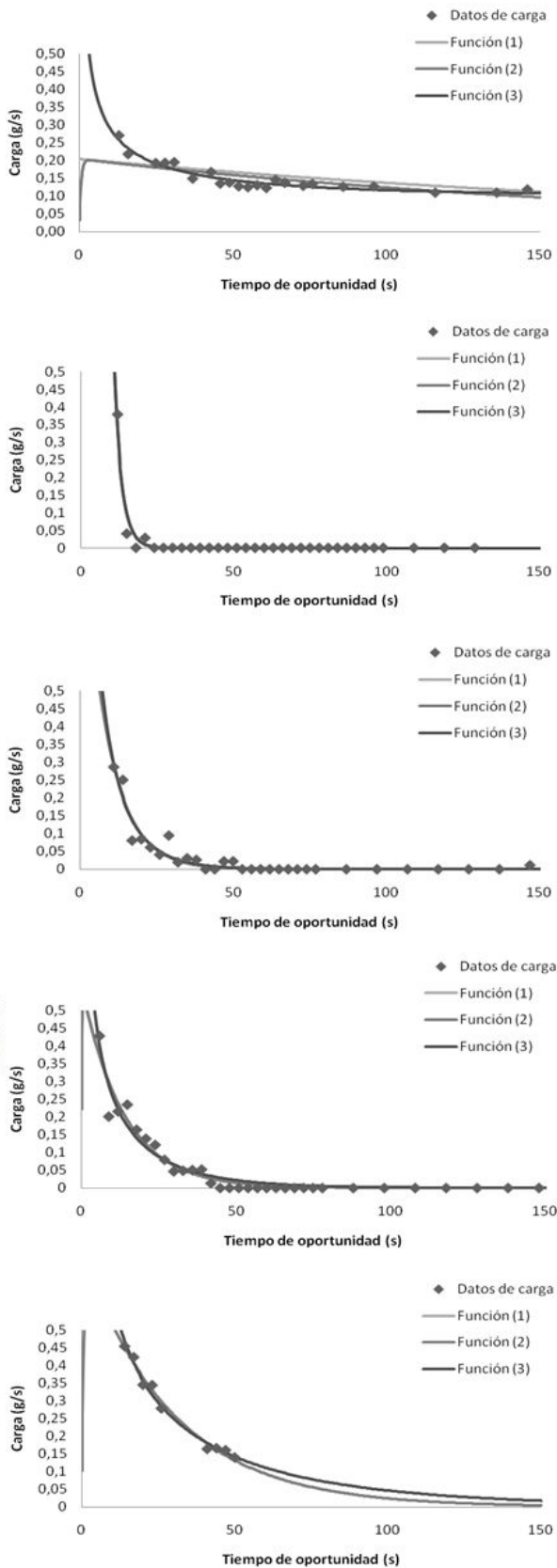


Fig. 5. Evolución de la carga de soluto estimada y ajustada mediante las ecuaciones (1) a (3), en los ensayos del 1 al 5.

Los coeficientes de ajuste de la función de carga (1) (Tabla 3) no pudieron considerarse buenos a todas las series de datos. Esta función de carga exponencial reproduce con un buen ajuste, desde un punto de vista macroscópico, los procesos implicados en los ensayos rápidos, pero que no reproduce bien el ensayo más lento, con mayor tiempo de encharcamiento.

Tabla 4. Parámetros de la función de carga (2) ajustada a los cinco ensayos y coeficientes de ajuste.

$Q_0(m^3/s)$	$W_a(kg/s)$	$\beta(s^{-1})$	$\lambda(s^{-1})$	R^2
$6.42 \cdot 10^{-3}$	$0.204 \cdot 10^{-3}$	0.005	1.758	0.625
$7.85 \cdot 10^{-3}$	$37.22 \cdot 10^{-3}$	0.393	6.461	0.994
$8.15 \cdot 10^{-3}$	$1.092 \cdot 10^{-3}$	0.120	11.00	0.919
$8.80 \cdot 10^{-3}$	$0.578 \cdot 10^{-3}$	0.074	4.993	0.920
$10.26 \cdot 10^{-3}$	$0.725 \cdot 10^{-3}$	0.034	1.564	0.984

En cuanto a la función de carga (2) (Tabla 4), tampoco pudieron considerarse buenos todos los ajustes. Esta función tiene una rama ascendente inicial, que dura un lapso de tiempo menor a mayor valor del flujo de escorrentía y una rama descendente con forma exponencial. El ascenso inicial de la función se produce en un intervalo de tiempo pequeño, por lo que en los ensayos de laboratorio es difícil registrar estas medidas. La función se ajusta, al igual que la primera, de manera óptima a los ensayos rápidos y el ajuste no es bueno para el ensayo con tiempo de encharcamiento mayor.

Tabla 5. Parámetros de la función de carga (3) ajustada a los cinco ensayos y coeficientes de ajuste.

$Q_0(m^3/s)$	$w_a(kg/s^{1/2})$	$\beta(s^{-1})$	R^2
$6.42 \cdot 10^{-3}$	$0.897 \cdot 10^{-3}$	-0.0026	0.935
$7.85 \cdot 10^{-3}$	$74.61 \cdot 10^{-3}$	0.3479	0.993
$8.15 \cdot 10^{-3}$	$2.590 \cdot 10^{-3}$	0.0889	0.922
$8.80 \cdot 10^{-3}$	$1.261 \cdot 10^{-3}$	0.0420	0.922
$10.26 \cdot 10^{-3}$	$2.177 \cdot 10^{-3}$	0.0155	0.986

Por último, la función de carga (3) (Tabla 5) fue la que mejores coeficientes de ajuste tuvo en conjunto. Esta función con un decrecimiento de forma exponencial es capaz, transcurrido un tiempo, de reproducir un ascenso moderado de valores de concentración a medida que aumenta el tiempo. Por esta razón se ajusta bien al ensayo lento y con un valor mayor del tiempo de encharcamiento.

4.- Conclusiones

Tras el análisis de los resultados obtenidos para un suelo arenoso y la comparación con los resultados de los trabajos de Nofuentes y Polo (2008), para un suelo franco, se puede advertir la importancia que juega el tipo de suelo, y con este el tiempo de encharcamiento, en el proceso de transferencia.

Para suelo franco, con tiempo de encharcamiento pequeño, los ajustes de la función de carga exponencial a

los datos de todos los ensayos realizados fueron buenos. Para un suelo arenoso, con tiempo de encharcamiento mayor, no todos los ajustes de la función de carga exponencial a los datos de los ensayos pudieron considerarse buenos. En un suelo con textura gruesa el ajuste de la función de carga exponencial (1) evoluciona desde un mal ajuste al ensayo con tiempo de encharcamiento mayor, a mejores ajustes a ensayos con mayores velocidades de flujo y menores tiempos de encharcamiento.

La función (2), reproduce mejor la mecánica de la transferencia al incluir la fase inicial de ascenso de la concentración. A medida que crece el valor del flujo superficial y disminuye el tiempo de encharcamiento, esta función se parece más a la función (1).

En un suelo con elevado tiempo de encharcamiento las concentraciones máximas no se registran simultáneamente a la llegada del frente. Esto puede observarse en la Fig. 5 atendiendo al intervalo entre el tiempo de oportunidad cero y el tiempo de la primera medida registrada. De esta forma, el elevado tiempo de encharcamiento permite que la cantidad de trazador infiltrada inicialmente sea tal que pueda ser removilizada y cargada por difusión al flujo de escorrentía. En el momento en que la concentración de soluto en el flujo superficial haya decrecido a valores inferiores que los que aporta el suelo cargado con trazador infiltrado, los valores de concentración pueden llegar a aumentar con el tiempo. Esto queda de manifiesto en el ensayo 1, con un transporte menos advectivo que ensayos con caudales mayores y con el mayor tiempo de encharcamiento de los cinco ensayos, pasado un tiempo en el que la concentración en el flujo superficial ha disminuido lo suficiente, el aporte de KBr inicialmente infiltrado en el suelo hace aumentar lentamente la concentración. Considerando esto, las formas que puede tomar la función de carga (3) describen de forma macroscópica mejor los procesos implicados en la transferencia de solutos del suelo al flujo de escorrentía en suelos en los que el tiempo de encharcamiento no es despreciable.

A modo de conclusión final, para las condiciones de los ensayos, para suelos con una elevada conductividad hidráulica en saturación, la función de carga (3) reproduce satisfactoriamente a escala macroscópica la evolución de la carga de soluto desde el suelo hacia el flujo superficial de agua, con independencia del caudal de aporte de agua (es decir, del tiempo de encharcamiento). El mejor ajuste encontrado para dicha función con respecto al conseguido con la función (2) disminuye a medida que el caudal de aporte de agua aumenta, es decir, para menores valores del tiempo de encharcamiento; en estos casos, la función (2) reproduce asimismo con suficiente grado de ajuste este proceso de transferencia a escala macroscópica, y equivale a los resultados obtenidos en el trabajo de Nofuentes y Polo (2008) con una función adicional exponencial de influencia insignificante para suelos con menor capacidad de infiltración.

Agradecimientos. Este trabajo se ha llevado a cabo dentro del proyecto CGL2008-03308 "Modelo multiescala de la transferencia de contaminantes

desde el suelo al flujo de escorrentía superficial y su transporte", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

La financiación del primer autor se ha realizado con la ayuda Predoctoral de Formación de Personal Investigador de referencia BES-2009-016085 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de hidráulica de la E.T.S.C.C.P de la Universidad de Castilla la Mancha.

5.- Referencias

- Ahuja, L. R., y Lehman, O. R. 1983. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff. *J. Environ. Qual.*, 12: 34-40.
- Castro, M., Gallardo, J.M., y Parés, C. 2006. High Order Finite Volume Schemes Based on Reconstruction of States for Solving Hyperbolic Systems with Nonconservative Products. Applications to Shallow Water Systems. *Math. of Computation.* 75: 1103-1134.
- Chapra, S.C. 1997. *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill. Nueva York.
- Dumbser, M., Eaux, C. y Toro, E.F., 2008. Finite Volume Schemes of Very High Order of Accuracy for Stiff Hyperbolic Balance Laws. *J. of Comp. Physics.* 227 (8):3971-4001.
- Galindo, P., de Luna, E., Castro, J., Polo, M.J., y Navarro, C. 2006. Herbicides used in olive groves. Behaviour in superficial runoff flow. *Olivebioteq. II Intern. Seminar on Biotechnology and Quality of olive tree products around the mediterranean basin.* pp. 9.
- Gao, B., Walter, M. T., Steenhuis, T. S., Parlange, J. Y., Richards, B. K., Hogarth, W. L., y Rose, C. W. 2005. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff. *J. Hydrol.*, 38: 313-320.
- Jiang, G.S. y Shu, C.W., 1996. Efficient implementation of weighted ENO schemes. *Journal of Computational Physics.* 126:202-228.
- Nofuentes, M., Polo, M.J., Giráldez, J. V. y Mateos, L. 2006. Solute transfer from soil surface to runoff as a boundary condition in open channel flow modeling. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal, A. Cardoso (eds.), *Riverflow 2006*. pp. 1907-1914. Taylor & Francis. London.
- Nofuentes, M., y Polo, M.J., 2008. A first approach to the characterization of solute transfer from soil to runoff in transient shallow flows. *Geophys. Res. Letters.* 35, L17406, doi:10.1029/2008GL034578.
- Nofuentes, M., y Polo, M.J., 2009. Evaluación de distintas funciones de infiltración acopladas en un modelo numérico de circulación de flujo en aguas someras. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. IX ZNS'09*. Pp.433.
- Nofuentes, M., Dumbser, M., Toro, E.F., y Polo, M.J., 2011. A Comparison of Overland Flow and Solute Transport Simulations Using the Kostiakov-Lewis and the Green and Ampt Infiltration Models. *Advances in Water Resources.* (en revisión).
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., y Miller, N., 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 109 1, pp. 62-70.
- Wallach, R., Jury, W.A., y Spencer, W.F. 1989. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: A diffusion-based soil model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:612-618.
- Walter, M.T., Gao, B., y Parlange, J.Y., 2007. Modeling soil solute release into runoff with infiltration. *J. Hydrol.*, 347: 430-437.
- Zangh, X.C., Norton, D., y Nearing, M.A. 1997. Chemical transfer from soil solution to surface runoff. *Water Resour. Res.*, 33:809-815.