

## IMPACTO DE LA INCERTIDUMBRE DEL SUELO URBANO EN EL DISEÑO Y LA RETROALIMENTACIÓN DE FILTROS VEGETALES PARA MITIGAR LA ESCORRENTÍA DE APARCAMIENTOS

R. Muñoz-Carpena<sup>1,2</sup>, J.J. López-Rodríguez<sup>1</sup>, M.A. Campo-Bescós<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Pamplona. e-mail: carpena@ufl.edu

<sup>2</sup>University of Florida, Agricultural and Biological Engineering, Gainesville, FL, USA.

**RESUMEN.** Los filtros vegetales (FV) son zonas de vegetación autóctona o implantada para controlar la contaminación por escorrentía. Si se diseñan y mantienen adecuadamente, pueden ser un importante componente activo de la infraestructura verde urbana (GI) para el control de contaminación superficial procedente de zonas impermeables como aparcamientos, carreteras, etc. Sin embargo, la incertidumbre del suelo urbano y su efecto sobre infiltración y escorrentía pueden limitar la eficacia de los FV para mitigar la contaminación urbana. Con el modelo VFSSMOD se analizó el efecto de suelos de relleno urbano en FV con escorrentía de un aparcamiento comparado con suelo nativo. El análisis indica que un FV de 20-30 m sobre suelo de relleno franco arenoso en las condiciones del estudio reduce notablemente hasta 40% del volumen de escorrentía y 90% de partículas y contaminantes asociados a estas fases. Sin embargo, esta mejora queda limitada cuando hay un horizonte limitante a 0.5 m de profundidad, con reducciones <15% de escorrentía. Los resultados informan a ingenieros y gestores de espacios urbanos sobre la eficacia y consideraciones de diseño de los FV para mitigación de escorrentía urbana como parte de estrategias GI.

**ABSTRACT.** Vegetated filters (VF) are areas of native or planted vegetation to control runoff pollution. If properly designed and maintained, they can be an important active component of urban green infrastructure (GI) for the control of surface pollution from impervious areas such as parking lots, roads, etc. However, the uncertainty of urban soil and its effect on infiltration and runoff can limit the effectiveness of VFs in mitigating urban pollution. Using the VFSSMOD model, the effect of urban refill soils on PV with runoff from a parking lot was analyzed and compared with the native soil. The analysis indicates that a 20-30 m VF on sandy loam fill soil under the conditions of the study significantly reduces up to 40% of the runoff volume and 90% of particulate matter and pollutants associated with these phases. However, this improvement is limited when there is a limiting horizon at 0.5 m depth, with <15% runoff reductions. The results inform engineers and urban space managers about the effectiveness and design considerations of PVs for urban runoff mitigation as part of GI strategies.

### 1.- Introducción

Los filtros vegetales (FV) son zonas de vegetación autóctona o implantada entre una fuente de contaminación superficial y una masa de agua receptora que están diseñadas para controlar la contaminación por escorrentía. Si bien se han adoptado ampliamente como buenas prácticas de gestión, (*Best Management Practices*, BMP) en el medio rural, si se diseñan y mantienen adecuadamente, pueden ser un importante componente activo de la infraestructura verde urbana (GI). Los espacios verdes urbanos existentes, que varían en tamaño, composición y ubicación, pueden convertirse, con algunas modificaciones, en eficaces FV para controlar los contaminantes habituales de la escorrentía urbana, como los metales pesados y los sólidos en suspensión. Para ello, es necesario comprender los procesos clave de flujo y transporte a través del FV que, en última instancia, controlan su eficacia para atrapar contaminantes. VFSSMOD (Muñoz-Carpena et al., 1993a,b; 1999; 2004), un modelo hidrológico y de calidad del agua para FV, se utiliza ampliamente para el diseño y la optimización de FV en muchos entornos, incluyendo su uso regulatorio para la aprobación y uso de plaguicidas en la Unión Europea, EEUU y otros países (Fox et al., 2021; Sabbagh et al., 2013). Estudios previos de campo y de simulación indican que los parámetros de infiltración del suelo controlan en gran medida la eficiencia de los FV para la captura de contaminantes transportados por la escorrentía superficial (Muñoz-Carpena et al., 1999; 2010). En especial, el efecto de la presencia de niveles freáticos someros bajo el FV por efecto estacional (épocas húmedas) o por la presencia de horizontes limitantes modifica de manera importante la dinámica de la zona no saturada del suelo del FV y su eficiencia para la captura de contaminantes superficiales (Fox et al., 2018). Un algoritmo de infiltración para el caso particular de suelos limitados por un nivel freático somero, SWINGO (Muñoz-Carpena et al., 2018), ha sido acoplado en VFSSMOD (Lauvernet et al., 2018) para el análisis de esta condición de infiltración limitada sobre el comportamiento del FV.

En general, para la implantación de zonas verdes urbanas es necesario que los suelos cumplan una serie de especificaciones establecidas por los ayuntamientos, que en general vienen recogidas en normativas. Al margen de esta afirmación, en ocasiones esta normativa no se cumple y algunos espacios verdes urbanos se asientan sobre suelos de relleno y poco profundos que varían en sus especificaciones y contenido dependiendo de su

proyecto de ingeniería inicial y el desarrollo de la obra final. Esto constituye una importante fuente de incertidumbre, además de la propia de la variabilidad espacial de los suelos, en el diseño de la retroalimentación de los FV urbanos que puede limitar la amplia adopción de esta BMP urbana.

El objetivo de este trabajo es el análisis sistemático del efecto del tipo de suelo y de lluvias en la eficiencia de FV para el filtrado de la escorrentía urbana procedente de zonas urbanas impermeables con el fin de ayudar al diseño de esta Técnica de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS). Para ello, este trabajo ha aprovechado el interés del Plan Estratégico de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) que pretende la readaptación del aparcamiento del Aulario de la UPNA con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) con el fin de gestionar el agua de escorrentía para reducir su impacto en el río Sadar. El análisis se basa en la aplicación del modelo VFSMOD bajo distintos escenarios de suelos y tormentas.

## 2.- Materiales y Métodos

### 2.1. Localización y características de la zona de estudio

El solar en el que se realiza el estudio es una parcela que se encuentra entre el aparcamiento del Aulario de la UPNA (Pamplona, España, y el río Sadar, al cual vierten sus aguas de escorrentía (Fig. 1). Esta parcela está prevista que sea zona verde en el Plan Urbanístico, aunque todavía está pendiente de desarrollo, y es en donde se contempla instalar un FV y un SUDS. El aparcamiento en cuestión tiene un gran nivel de uso, con entrada de varias líneas de autobuses urbanos.



Fig. 1. Localización y características de la zona de estudio (coordenadas 42.801, -1.637, Datum: WGS84).

El aparcamiento tiene una superficie de 21.200 m<sup>2</sup> (302 x 70 m) con un 1% de pendiente longitudinal. Se plantea readaptar el aparcamiento eliminando barreras en un lado para dirigir la escorrentía con un esparcidor lateral sobre la zona verde que protege el arroyo localizado aguas

abajo. La zona verde se compone de un talud de 30 m y pendiente del 14% cubierto de hierba hasta una planicie donde se encuentra el arroyo rodeado de vegetación arbustiva espontánea (Fig. 1).

Interesa explorar el efecto de la implantación de un FV en el talud (manteniendo longitudes de FV entre 1 a 30 m). Para ello se analiza el impacto de 3 condiciones del suelo que suelen ser típicos en la implantación de zonas verdes urbanas: suelo nativo local compuesto de margas franco-arcillosas con una textura franco arcillosa (26.4% Ar, 34.8% Lm, 38.8% Ac), suelo de normativa (denominamos así a los suelos implantados con los criterios establecidos en las Normas Técnicas del Servicio de Zonas Verdes del Ayuntamiento, en este caso, de Pamplona) con una textura Franco Arenosa, y el suelo de normativa con horizonte limitante que genere un nivel freático somero a 0.5 m de profundidad (Fig. 2). Los suelos nativos y de normativa se consideraron sin limitación en el frente de avance de infiltración en el tiempo. En la Tabla 1 se muestran los valores de los parámetros hidráulicos del suelo estimados a partir de su textura (Schapp et al., 2001; Yang and You, 2013).



Fig. 2. Escenarios de tipos de suelo considerados.

Tabla 1. Características hidráulicas de los suelos utilizados en el estudio, donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica a saturación;  $S_{av}$  es la succión en el frente de avance de Green-Ampt;  $\theta_i$ ,  $\theta_s$  son la humedad del suelo inicial y a saturación; y  $\theta_r$ ,  $\alpha$  y  $n$  son los parámetros de las curvas característica de van Genuchten (con  $m=1-1/n$ ).

Suelo	Textura	$K_s$ (m/s)	$S_{av}$ (m)	$\theta_i$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (m <sup>-1</sup> )	$n$
Nativo	Fr-Ac	1,19e-6	0,2088	0,48	0,24	--	--	--
Normativa	Fr-Ar	1,39e-5	0,1101	0,45	0,225	--	--	0,128
Norm./lim.	Fr-Ar	1,39e-5	0,1101	0,45	--	0,076	1,147	--

Las características de la lluvia (duración, intensidad y distribución) son unos factores clave en el balance hidrológico de una superficie y, por lo tanto, a la hora de establecer las condiciones de diseño de un FV. Por dicho motivo, para este análisis se han considerado doce tormentas de diseño características en la zona estudiada diferentes en base a: la magnitud (periodos de retorno, T, de 2, 5 y 10 años); la duración, D (2, 4 y 8 h); y tipo de distribución temporal: I (S1) y II (S2) según USDA-NRCS (1986). En la Tabla 2 se resumen las características de todas las tormentas consideradas. Los valores de precipitación diaria asociada a los periodos de retorno considerados se estimaron mediante análisis regional de frecuencias de las precipitaciones diarias en Navarra aplicado a la Estación Meteorológica Automática (EMA) de la ETSIAB de la UPNA (Fig. 1) (López et al., 2019).

Con estos datos se generaron los yetogramas sintéticos para cada una de las tormentas seleccionadas. Los hidrogramas de escorrentía, procedente del aparcamiento para cada tormenta tipo, se determinaron utilizando el método TR-55 del hidrograma tabular, en el que se aplicó un número de curva  $CN=97$  correspondiente a aparcamientos (Tabla 2). El método se basa en el cálculo del hidrograma por convolución y escalado de los excesos de lluvia a lo largo de la tormenta a partir de incrementos de lluvia de los yetogramas (USDA-NRCS, 1986). Todo ello se realizó aplicando el programa UH v3.0.6 incluido en el paquete de distribución de VFSMOD (Muñoz-Carpena, 2020).

**Tabla 2.** Características de las tormentas consideradas y valores de escorrentía estimados para las mismas desde el aparcamiento.  $T2$ ,  $T5$ , y  $T10$  corresponden a tormentas con periodo de retorno de 2, 5 y 10 años;  $S1$  y  $S2$  corresponden a yetogramas tipo NRCS II y III;  $D$  es la duración de la tormenta;  $P$  es el volumen total de lluvia;  $i$  es la intensidad media de la tormenta; y  $RO$  es la escorrentía estimada para el aparcamiento (con número de curva  $CN=97$ ).

Tormenta	T2	T5	T10	T2	T5	T10	T2	T5	T10	T2	T5	T10
	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S2	S2	S2	S2	S2	S2
	D2	D2	D2	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D8	D8	D8
$P$ (mm)	25,3	35,8	42,8	32,6	46,2	55,3	32,6	46,2	55,3	40,8	57,8	69,1
$D$ (h)	2	2	2	4	4	4	4	4	4	8	8	8
$i$ (mm/h)	12,6	17,9	21,4	8,1	11,5	13,8	8,2	11,56	13,81	5,10	7,23	8,64
$RO$ (mm)	17,8	27,8	34,6	24,7	38,0	46,8	24,7	38,0	46,8	32,6	49,3	60,5

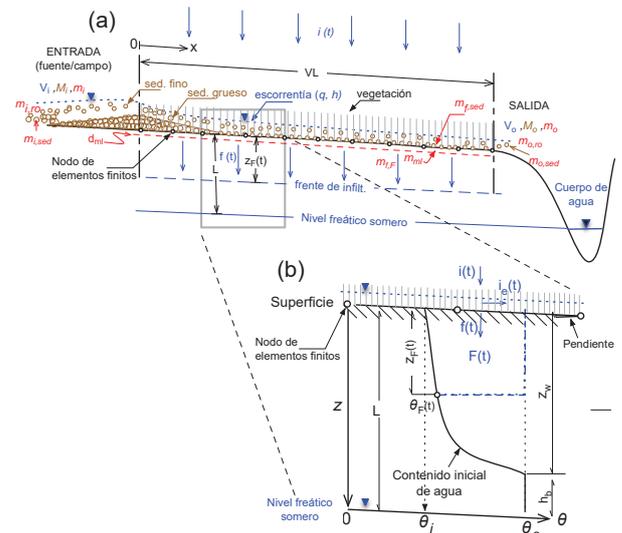
El tamaño mediano de partículas (sedimento) procedente del aparcamiento se seleccionó tras una revisión bibliográfica de valores típicos para un rango de condiciones amplio (Ball *et al.*, 1998; Borris *et al.*, 2016; Gnecco, 2019; Göbel *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2005; Zafra *et al.*, 2007). Esto corresponde a un diámetro mediano de  $d_{50}=0,00675$  cm, densidad específica  $\gamma_s=2.65$  g/cm<sup>3</sup>, concentración de entrada  $C_i=0,000066$  g/cm<sup>3</sup> y porosidad de deposición en superficie  $por=43,4$  %. El tipo de vegetación en el talud verde existente en la zona que se empleará de FV consiste en mezcla herbácea densa (césped) con separación de tallos media  $S_s=2,2$  cm (densidad  $\sim 2100$  tallos/m<sup>2</sup>), rugosidad de Manning  $n=0,4$  s/m<sup>1/3</sup>, y rugosidad específica de la superficie del material vegetal de  $n_m=0,012$  s/cm<sup>1/3</sup> (Haan *et al.*, 1994), mantenida mediante corte a una altura de  $H=15$  cm.

## 2.2. Simulación numérica y análisis

La infiltración, flujo y mecánica de transporte y deposición de sedimentos en el FV se simuló con el modelo VFSMOD v4.4.3 (Muñoz-Carpena *et al.*, 2020). El modelo acopla (Fig. 3) la solución numérica en elementos finitos del flujo dinámico superficial (Muñoz-Carpena *et al.*, 1993a), infiltración bajo condiciones de suelo profundo con el modelo de Green-Ampt modificado para tormentas naturales (Chu, 1978; Mein and Larson 1971, 1973; Skaggs and Khaheel, 1982; Muñoz-Carpena *et al.*, 1993b), infiltración bajo condiciones limitadas por un freático somero descritas por el modelo SWINGO (Muñoz-Carpena *et al.*, 2018, Lauvernet *et al.*, 2018; Fox *et al.*, 2018), mecánica de

deposición de sedimentos en vegetación densa (Muñoz-Carpena *et al.*, 1999) y el transporte y degradación de contaminantes (sales, pesticidas, coloides).

Numerosos estudios han demostrado la capacidad del modelo para predecir el flujo, la infiltración y la eficiencia de captura de sedimentos (Muñoz-Carpena *et al.*, 1999; Abu-Zreig, 2001; Dosskey *et al.*, 2002; Fox *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2005; Pan *et al.*, 2017; Fox *et al.*, 2018); trazadores y solutos multirreactivos (Pérez-Ovilla, 2010); fósforo (Kuo y Muñoz-Carpena, 2009), coloides (Yu *et al.*, 2013) y pesticidas (Sabbagh *et al.* 2009; Poletika *et al.*, 2009; Reichenberger *et al.*, 2019; Muñoz-Carpena *et al.*, 2019) y su degradación (Muñoz-Carpena *et al.*, 2015). De interés para este trabajo es el tratamiento de la infiltración, y en particular la forma integral de la solución de infiltración bajo condiciones de agua freática somera de SWINGO, que a pesar de su simplicidad aporta resultados muy precisos comparados con datos experimentales (Lauvernet *et al.*, 2018; Fox *et al.*, 2018) y contrastados con otras soluciones como la de Richards y otros (Muñoz-Carpena *et al.*, 2018; 2021).



**Fig. 3.** Esquema del acoplamiento en el modelo VFSMOD entre los procesos de (a) escorrentía y transporte superficial de sedimento y contaminantes a través del filtro vegetal durante la tormenta, y (b) infiltración bajo condiciones de nivel freático somero. Donde  $VL$  es la longitud del FV;  $i$ ,  $f$ : intensidad de lluvia e infiltración con  $i_e=i-f$ ;  $q$ ,  $h$ : flujo superficial y profundidad de escorrentía;  $F$ : infiltración acumulada;  $z_f$ : profundidad del frente de infiltración;  $\theta$ : humedad volumétrica del suelo;  $V$ ,  $M$ ,  $m$ : volumen de escorrentía, masa de sedimento y de contaminante. Los subíndices denotan: inicial ( $i$ ), final ( $o$ ), filtro ( $f$ ), agua infiltrada ( $r$ ), capa superficial de mezcla ( $m$ ), sedimento ( $sed$ ), escorrentía ( $ro$ ) y saturación ( $s$ ), respectivamente.

Para el análisis se combinaron los efectos de las 3 condiciones de suelo (Tabla 1), 12 diferentes tormentas esperadas en la zona (Tabla 2), y tamaño de FV (longitud,  $VL$ ) entre 1-30 m a incrementos de 1 m. Esto resultó en un total de 1080 simulaciones con VFSMOD. De cada simulación se obtuvo la eficiencia de reducción (filtrado) de partículas (TSS) procedentes del aparcamiento en el filtro (valores entre 0-1), su equivalencia en Kg de TSS a la salida del FV, y la porción de escorrentía que sale del FV,  $RDR=$

(escorrentía de entrada)/(escorrentía de salida), donde la eficiencia de reducción de escorrentía en el FV es  $E_r=1-RDR$ . RDR es mayor que 1 cuando el flujo de escorrentía de salida es mayor que el de entrada, correspondiente al caso en el que el volumen de infiltración en el suelo del FV es menor que la lluvia caída sobre el mismo y por tanto la escorrentía de salida es la de entrada más el exceso de lluvia. Este puede ser el caso de lluvias elevadas sobre suelos poco permeables.

### 3.- Resultados

Los resultados obtenidos para todas las combinaciones estudiadas se presentan en la Figura 4. La carga total de TSS desde el aparcamiento puede llegar a ser de 50-70 Kg dependiendo del tipo de tormenta. En todos los suelos, las eficiencias esperadas de reducción de TSS son del 58-95%, dependiendo del tipo de tormenta y del tamaño del FV (1-30 m), donde los filtros más largos sólo permiten el paso de hasta 1.5 Kg de TSS para la tormenta más grande (T=2 años, Tipo II, D=8 horas).

Los resultados presentan una sedimentación diferenciada a lo largo del FV. En los primeros 5-10 m de FV, se concentra la mayor parte de la deposición de sedimentos. Esto aporta información útil de cara al dimensionado de los filtros bajo condiciones diversas de lluvia y carga de contaminantes procedentes de superficies asfaltadas.

El suelo nativo de textura fina (franco arcilloso, CL) (Fig. 4A) limitó la infiltración en el filtro, y la sedimentación por la densa vegetación es la principal responsable de las altas reducciones de TSS obtenidas. El suelo de normativa (Fig. 4B) es más permeable y puede aumentar la eficiencia del filtro por el aumento de la infiltración. Sin embargo, este efecto se ve anulado por la presencia de capas impermeables causadas por el material heterogéneo a menudo enterrado en las obras de construcción por debajo del suelo de relleno que dan lugar a un nivel freático somero y a la pérdida de infiltración del suelo (Fig. 4C). En definitiva, este comportamiento diferenciado en la infiltración afecta a la capacidad de retención por el FV de las sustancias disueltas en la escorrentía. Es interesante mencionar que en los casos de suelo sin horizonte limitante se consideraron suelos profundos y en las condiciones del estudio se predicen profundidades de infiltración máximas próximas a 1 m de profundidad durante la mayor de las tormentas. Sin embargo, para taludes con pendientes elevadas como los del estudio es posible que los suelos tengan menor profundidad y la eficiencia de FV en estos casos sea menor que la encontrada. De manera similar, la posición del horizonte limitante para el último suelo también afectaría la eficiencia del FV, por lo que los resultados presentados, aunque indicativos, son específicos para el caso de profundidad del horizonte a 0.5 m estudiado como ejemplo. Ambos casos de limitación de la infiltración por el horizonte limitante o poca profundidad del suelo condicionarían la presencia de un nivel freático somero a distintas profundidades del

suelo. Estudios anteriores (Lauvernet et al., 2018) indican que la posición del nivel freático somero tiene un efecto importante en la eficiencia del FV, mayor cuanto más superficial, aunque este efecto es inapreciable cuando la profundidad es superior a 1-2 m dependiendo de la textura del suelo.

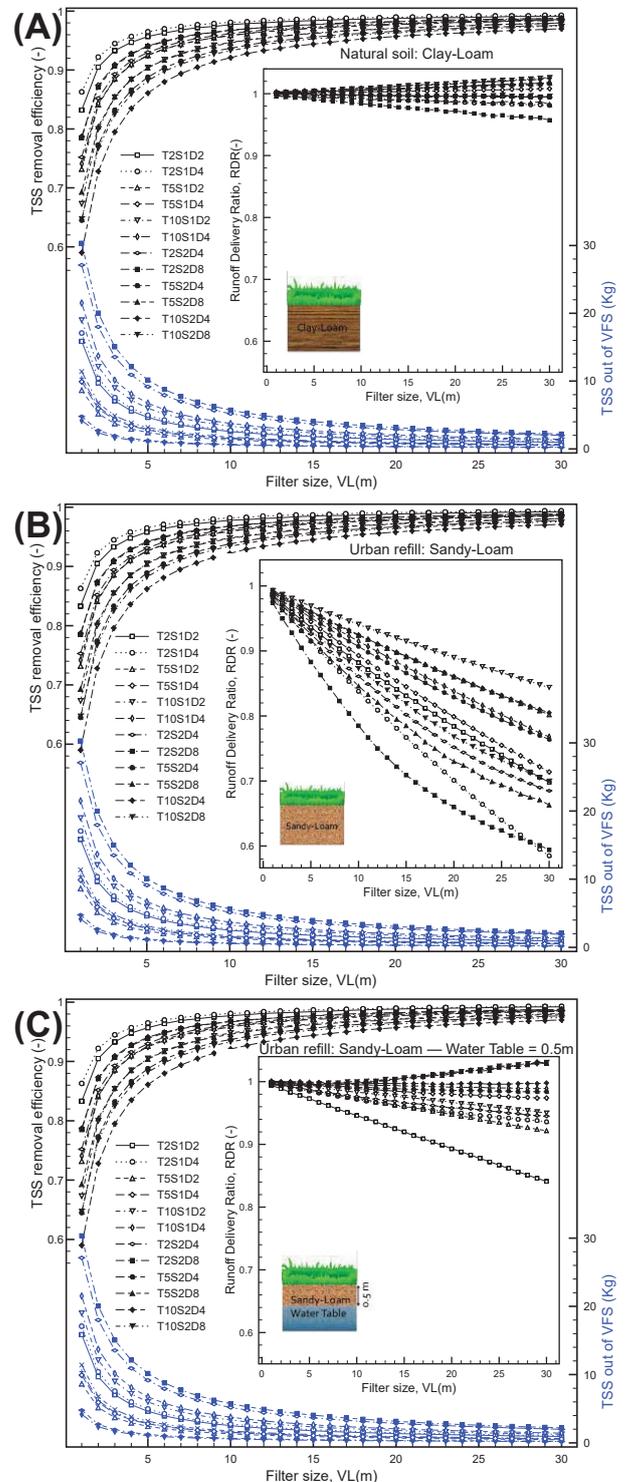


Fig. 4. Eficiencia de reducción en el FV de solidos totales en suspensión de escorrentía (TSS), y escorrentía (1-RDR) para los casos de (A) suelo nativo franco-arcilloso, (B) suelo artificial franco-arenoso, y (C) el suelo artificial con horizonte limitante a 0.5 m de profundidad.

#### 4.- Próximos pasos

El estudio se ampliará incluyendo condiciones adicionales de posición del horizonte limitante o profundidad efectiva del suelo, así como la simulación de metales pesados procedentes de superficies asfaltadas. En primer lugar, se realizará una revisión sistemática de la bibliografía de los factores considerados en la parametrización de metales pesados en este contexto. A continuación, se realizará un análisis global de sensibilidad e incertidumbre (GSUA) para analizar la importancia relativa de los factores de entrada variables (tipo y heterogeneidad del suelo, características de las partículas de lavado, parámetros de transporte de metales pesados, trayectorias de flujo, características del relleno, tipos de tormenta). Con los factores importantes se empleará el filtrado de Monte-Carlo para diseñar un FV optimizado que permita alcanzar los objetivos de reducción de TSS y sus contaminantes asociados (metales pesados, orgánicos) para protección del agua superficial en la zona.

#### 5.- Conclusiones

Los filtros vegetativos (FV) combinados con zonas de aparcamiento y carreteras debidamente acondicionadas pueden ser soluciones eficaces de infraestructura verde destinadas a capturar los SST y los metales pesados de la escorrentía. Sin embargo, su efectividad depende de la zona no saturada ya que ésta determina la partición del flujo de entrada en superficial o sub-superficial y en función de esto los procesos de sedimentación e infiltración y la consecuente retención en el FV de contaminantes adsorbidos o en disolución.

El suelo de normativa, comparado con el suelo nativo del lugar estudiado, puede mejorar la eficacia de la infiltración de la escorrentía del FV. Sin embargo, la heterogeneidad de este material (dependiendo de las especificaciones del proyecto y la aplicación) puede anular esta mejora al contener capas impermeables o limitantes para la infiltración.

El modelo numérico VFSSMOD es una potente herramienta para el análisis de la mitigación de la contaminación por escorrentía urbana con vegetación densa en el entorno urbano.

*Agradecimientos.* RMC desea agradecer al programa PDL de la Universidad de Florida, a la UPNA y a Bayer CropSys el apoyo recibido durante su estancia sabática 2019-2020 en Pamplona. JJJ desea agradecer el apoyo del proyecto de demostración EU LIFE “urban stormwater demonstration project”.

#### 6.- Bibliografía

Abu-Zreig, M., 2001. Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: simulation study using VFSSMOD. *Hydrol. Process.* 15 (8), 1477e1488.

Ball, J.E., Jenks, R. and Aubourg, D., 1998. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces. *Sci. Total Environ.* 209 (2-3), 243-254

Borris, M., Österlund, H., Marsalek, J. and Viklander, M., 2016. Contribution of coarse particles from road surfaces to dissolved and particle-bound heavy metal loads in runoff: A laboratory leaching study with synthetic stormwater. *Sci. Total Environ.*; 573: 212-221.

Dosskey, M.G., Helmers, M.J., Eisenhauer, D.E., Franti, T.G., Hoagland, K.D., 2002. Assessment of concentrated flow through riparian buffers. *J. Soil Water Conserv.* 57, 336e343.

Fox, A.L., Eisenhauer, D.E., Dosskey, M.G., 2005. Modeling Water and Sediment Trapping by Vegetated Filters Using VFSSMOD: Comparing Methods for Estimating Infiltration Parameters. ASABE, St. Joseph. MI. ASAE Paper Number 052118.

Fox, G., R. Muñoz-Carpena and R. Purvis. 2018. Controlled laboratory experiments and modeling of vegetative filter strips with shallow water tables. *J. of Hydrology* 556(1):1-9, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.10.069

Fox, G.A., R. Muñoz-Carpena, B. Brooks, T. Hall. 2021. Advancing surface water pesticide exposure assessments for ecosystem protection. *Trans. ASABE* 64(2): 377-387, doi:10.13031/trans.14225

Göbel P., Dierkes, C. and Coldewey, W.G., 2007. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *J. Cont. Hydrol.*; 91: 26-42

Gnecco, I., A. Palla & J.J. Sansalone, 2019b. Partitioning of zinc, copper and lead in urban drainage from paved source area catchments. *J. Hydrol.*, 578. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124128>

Haan, C. T., B. J. Barfield and J. C. Hayes. 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. San Diego: Academic Press

Han, J., Wu, J.S. and Allan, C., 2005. Suspended Sediment Removal by Vegetative Filter Strip Treating Highway Runoff. *J. Environ. Sci. Health* 40, 1637e1649. <https://doi.org/10.1081/ESE-200060683>.

Kuo, Y.M., Muñoz-Carpena, R., 2009. Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filter strips to control runoff pollution from phosphate mining areas. *J. Hydrol.*: 378, 343-354. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.039>.

Lauvernet, C. and Muñoz-Carpena, R., 2018. Shallow water table effects on water, sediment and pesticide transport in vegetative filter strips: Part B. model coupling, application, factor importance and uncertainty, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22:71-87. doi:10.5194/hess-22-71-2018

López, J.J., Goñi, M., San Martín, I., Erro, J, 2018. Regional frequency analysis of annual maximum daily rainfall in Navarra. Quantiles mapping. *Ingeniería del Agua*, 23(1): 33-51. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10058>.

Muñoz-Carpena R., C. Lauvernet, N. Carluer, G. Fox. 2021. Modeling slope rainfall-infiltration-runoff process with shallow water table during complex rainfall patterns” by Wu et al. (2021). *J. Hydrol.* (In press).

Muñoz-Carpena, R. 2020. *VFSSMOD-W Vegetative Filter Strips Modelling System. Model documentation, user's manual and program download. Version 4.4.3.* Agricultural and Biological Engineering, University of Florida. URL: <https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/vfssmod/>.

Muñoz-Carpena, R. and J.E. Parsons. 2004. A Design Procedure for Vegetative Filter Strips Using VFSSMOD-W. *Trans. of ASAE* 47(5):1933-1941.

Muñoz-Carpena, R., C.T. Miller, and J.E. Parsons. 1993. A Quadratic Petrov-Galerkin Solution for Kinematic Wave Overland Flow. *Water Resour. Res.* 29(8):2615-2627.

Muñoz-Carpena, R., G.A. Fox and G.J. Sabbagh. 2010. Parameter Importance and Uncertainty in Predicting Runoff Pesticide Reduction with Filter Strips. *J. Environ. Qual.* 39(1): 630-641. doi:10.2134/jeq2009.0300.

Muñoz-Carpena, R., J.E. Parsons, and J.W. Gilliam. 1993. Numerical Approach to the Overland Flow Process in Vegetative Filter Strips. *Trans. of ASAE*: 36(3):761-770.

Muñoz-Carpena, R., J.E. Parsons, and J.W. Gilliam. 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *J. Hydrol.*: 214(1-4):111-129.

Muñoz-Carpena, R., Lauvernet, C., and Carluer, N. 2018. Shallow water table effects on water, sediment and pesticide transport in vegetative filter strips: Part A. non-uniform infiltration and soil water redistribution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*: 22:53-70. doi:10.5194/hess-22-53-2018

Muñoz-Carpena, R. A. Ritter, G.A. Fox and O. Perez-Ovilla. 2015. Does mechanistic modeling of filter strip pesticide mass balance and

- degradation affect environmental exposure assessments? *Chemosphere* 139:410-421. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.07.010
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, G. Fox. 2019. Comparison of empirical and mechanistic equations for vegetative filter strip pesticide mitigation in long-term environmental exposure assessments. *Water Research*, 165:1149833. doi:10.1016/j.watres.2019.114983
- Pan, D., Gao, X., Dyck, M., Song, Y., Wu, P., Zhao, X., 2017. Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: run-on experiments and modeling. *Sci. Total Environ.* 593/594, 54e64 j.scitotenv.2017.03.158.
- Perez-Ovilla, O., 2010. Modeling Runoff Pollutant Dynamics through Vegetative Filter Strips: a Flexible Numerical Approach. Ph.D. Thesis. University of Florida, Gainesville, p. 195. <http://ufdc.ufl.edu/UFE0042122/00001>.
- Poletika, N.N., Coody, P.N., Fox, G.A., Sabbagh, G.J., Dolder, S.C., White, J., 2009. Chlorpyrifos and atrazine removal from runoff by vegetated filter strips: experiments and predictive modeling. *J. Environ. Qual.* 38 (3), 1042e1052.
- Reichenberger, S., Sur, R., Kley, C., Sittig, S., Multsch, S., 2019. Recalibration and cross-validation of pesticide trapping equations for vegetative filter strips (VFS) using additional experimental data. *Sci. Total Environ.* 647, 534e550.
- Sabbagh, G.J., Fox, G.A., Kamanzi, A., Roepke, B., Tang, J.Z., 2009. Effectiveness of vegetative filter strips in reducing pesticide loading: quantifying pesticide trapping efficiency. *J. Environ. Qual.* 38 (2), 762e771.
- Sabbagh, G.J., R. Muñoz-Carpena, G.A. Fox. 2013. Distinct influence of filter strips on acute and chronic pesticide aquatic environmental exposure assessments across U.S. EPA scenarios. *Chemosphere* 90(2):195-202. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.06.034
- Schaap, M.G., F.J. Leij, and M. Th. van Genuchten, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251:163-176.
- Winchell, M.F., R.L. Jones and T.L. Estes. 2011. *Comparison of Models for Estimating the Removal of Pesticides by Vegetated Filter Strips*. In: Goh et al.(eds.), *Pesticide Mitigation Strategies for Surface Water Quality*. Chapter 17. Pp. 273-286. ACS Series. American Chemical Society: Washington, DC.
- USDA-NRCS. 1986. *Urban hydrology for small watersheds. 210-VI-TR-55*, 2nd ed. Washington, D.C.: USDA-NRCS.
- Yang, X. and X. You, 2013. Estimation Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms. *Appl. Math. Sci.*, 7(5), 1977-1983. DOI: 10.12785/amis/070537.
- Yu, C., Muñoz-Carpena, R., Gao, B., Perez-Ovilla, O., 2013. Effects of ionic strength, particle size, flow rate, and vegetation type on colloid transport through a dense vegetation saturated soil system: experiments and modeling. *J. Hydrol.*: 499, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.004>.
- Zafra, C. A., J. Temprano & I. Tejero, 2007. Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación*, 27(1), 4-10.