

Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible

Arturo Trapote Jaume¹

Artículo recibido: 13 de octubre de 2016 / Aceptado: 12 de diciembre de 2016

RESUMEN

El crecimiento de las ciudades provoca modificaciones sustanciales en el ciclo hidrológico natural en entornos urbanos. Con la impermeabilización del suelo -efecto representativo del desarrollo urbano-, se reduce la infiltración y, por consiguiente, aumenta la escorrentía superficial. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) contribuyen a revertir, al menos en parte, estas consecuencias adversas del proceso de urbanización. En el presente trabajo se lleva a cabo un análisis de las implicaciones hidrológico-hidráulicas de la implantación de SUDS en entornos urbanos. A partir del supuesto de la urbanización de un típico sector urbano, se relacionan las disminuciones del coeficiente de escorrentía asociadas a diversos grados de implantación de SUDS, con las correspondientes reducciones del caudal punta y del diámetro del colector que drena la cuenca de estudio, aplicando modelos de cálculo tradicionales, como son el Método Racional y la fórmula de Manning, respectivamente. Asimismo, se ha evaluado la influencia del coeficiente de escorrentía sobre el riesgo de inundación en base a la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento de precipitación, según diferentes periodos de retorno. Los resultados obtenidos permiten cuantificar los efectos hidrológico-hidráulicos de la implementación de SUDS en cuencas urbanas, comprobándose que las reducciones porcentuales del coeficiente de escorrentía implican reducciones porcentuales idénticas del caudal de escorrentía generado en la cuenca, que con la reducción porcentual del coeficiente de escorrentía de la cuenca se obtiene una significativa disminución porcentual del diámetro del colector de drenaje y que la reducción porcentual del coeficiente de escorrentía representa una disminución de la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento de precipitación, disminuyendo, en consecuencia, el riesgo de inundación.

¹ Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante, España. Correo electrónico: atj@ua.es, Autor de correspondencia: atj@ua.es.

Palabras clave: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), desarrollo urbano, escorrentía, impermeabilización, riesgo de inundación.

Management of Rainwater in Urban Environments through Sustainable Drain Techniques

ABSTRACT

The development of cities results in substantial modifications of the natural hydrologic cycle in urban environments. With the weatherization of the soil (representative effect of urban development), infiltration is reduced and therefore surface runoff is increased. Urban Sustainable Drain Systems (USDS) are a significant contribution to reverse at least in part the adverse consequences of the urbanization process. This research shows an analysis of the hydrologic and hydraulic implications of the USDS implementation in urban environments. From the assumption of urbanization of a typical urban sector, decrease of runoff coefficient –associated to several degrees of USDS implementation- is related to relevant decrease of peak flow and the diameter of the collector which drains the study basin, by applying traditional calculation models such as the Rational Method and the Manning formula, respectively. Likewise, the influence of the runoff coefficient over the flooding risk has been evaluated based on the probability of occurrence of a specific rain event, according to different return

periods. Results obtained allow quantifying the hydrologic and hydraulic effects of USDS implementation in urban basins, demonstrating that percentage decreases of runoff coefficient imply identical percentage decreases of the runoff flow generated at the basin and, with the percentage reduction of the runoff coefficient of the basin, a significant percentage reduction of the drainage collector diameter is observed and the percentage reduction of the runoff coefficient represents a decrease of the probability of occurrence of a specific rain event, thus decreasing the flooding risk.

Key words: Urban Sustainable Drain Systems (USDS); urban development; runoff; weatherization; flooding risk.

Gestão das águas pluviais em entornos urbanos mediante técnicas de Drenagem Sustentável

RESUMO

O crescimento das cidades provoca mudanças substanciais no ciclo hidrológico natural em entornos urbanos. Com a impermeabilização do solo -efeito representativo do desenvolvimento urbano-, se reduz a infiltração e, por consequência, aumenta a escoamento superficial. Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) contribuem a reverter, pelo menos em parte, estas consequências adversas do processo de urbanização. No presente

trabalho se leva a cabo uma análise das implicações hidrológico-hidráulicas da implantação de SUDS em entornos urbanos. A partir do suposto da urbanização de um típico sector urbano, se relacionam as diminuições do coeficiente de escoamento, associadas a diversos graus de implantação de SUDS, com as correspondentes reduções do caudal punta e do diâmetro do coletor que drena a bacia de estudo, aplicando modelos de cálculo tradicionais, como são o Método Racional e a fórmula de Manning, respectivamente. Da mesma forma, se há avaliado a influência do coeficiente de escoamento sobre o risco de inundação, na base à probabilidade de ocorrência de um determinado evento de precipitação, segundo diferentes períodos de retorno. Os resultados obtidos permitem quantificar os efeitos hidrológico-hidráulicos da implementação de SUDS em bacias urbanas, comprovando-se que as reduções percentuais do coeficiente de escoamento implicam reduções percentuais idênticas do caudal de escoamento gerado na bacia, que com a redução percentual do coeficiente de escoamento da bacia se obtém uma significativa diminuição percentual do diâmetro do coletor de drenagem e que a redução percentual do coeficiente de escoamento representa uma diminuição da probabilidade de ocorrência de um determinado evento de precipitação, diminuindo, em consequência, o risco de alagamento.

Palavras chave: Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), desenvolvimento urbano, escoamento, impermeabilização, risco de alagamento.

■ INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano comporta importantes cambios en los usos del suelo que alteran el ciclo hidrológico natural y agravan los problemas relacionados con el drenaje y la gestión de las aguas pluviales. El aumento de la cantidad de escorrentía superficial (*surface runoff*) es una de las más importantes consecuencias adversas del proceso de urbanización, junto con la disminución de la calidad de la escorrentía y la desnaturalización del ambiente urbano.

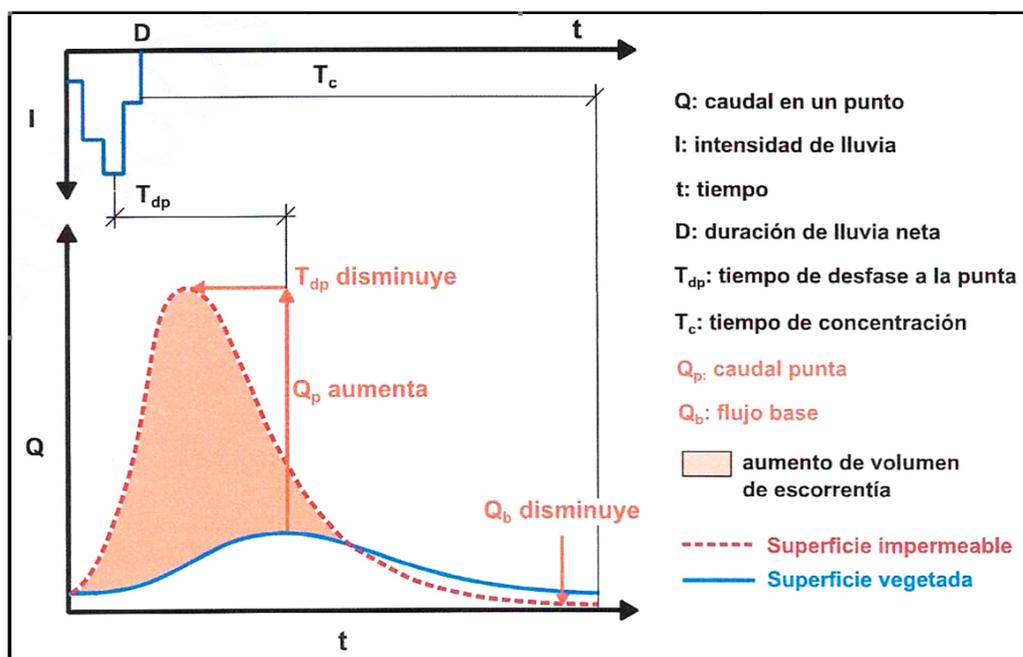
En el proceso de urbanización, las superficies naturales van siendo progresivamente sustituidas por edificaciones, viarios y otras superficies impermeables que impiden o reducen significativamente la infiltración, la interceptación, la detención, la retención y la evapotranspiración. La impermeabilización del suelo tiene una singular incidencia en el balance infiltración-escorrentía, de manera que en un área natural la infiltración representa entre el 80% y el 90% del agua precipitada y la escorrentía entre el 10% y el 20%, en un área residencial (densidad media-baja) la infiltración puede suponer entre el 50% y el 60% y la escorrentía entre el 40% y el 50%, mientras que en un área altamente urbanizada la infiltración es del 0% al 10% y la escorrentía aumenta hasta el 90%-100% (GSMM, 2016).

En términos hidrológicos, con la impermeabilización del suelo no solo se incrementa el volumen de la escorrentía, sino que, además, se modifica sustancialmente el hidrograma de tormenta al redistribuirse el flujo de agua procedente de la lluvia. Esta circunstancia se muestra gráficamente en la Figura 1, en donde se representa el

hidrograma de respuesta de una cuenca, antes y después de ser urbanizada, ante un evento de precipitación de duración D e

intensidad I variable (pluviograma de la parte superior de la figura).

Figura 1. Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía



Fuente: Perales, 2014

Se puede observar en la Figura 1 que, al impermeabilizar la cuenca, se genera un caudal pico o punta (Q_p) mucho mayor y se reduce el tiempo de desfase de la punta (T_{dp}), esto es, el tiempo de llegada al punto de control. Asimismo, la pendiente más pronunciada de la rama ascendente del hidrograma denota que la velocidad de llegada es mucho mayor. A partir de Q_p el caudal desciende bruscamente, llegando a situarse por debajo del caudal base (Q_b) que se tendría en condiciones naturales. En la cuenca preurbanizada (natural), una gran parte del agua precipitada se infiltra al subsuelo mientras el resto fluye por la superficie en forma de escorrentía. En cambio, en una cuenca posurbanizada

(impermeabilizada), la mayor parte del agua de lluvia fluye por la superficie en forma de escorrentía (Perales, 2014).

Ante esta situación, puede actuarse de tres maneras diferentes: no hacer nada (y asumir inundaciones más frecuentes), aumentar la capacidad de la red de drenaje convencional (con el consiguiente coste económico) o implantar técnicas alternativas de drenaje. Entre estas últimas se encuadran las conocidas, en general, como Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS) o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) (*Best Management Practices, BMP* o *Low Impact Development, LID*, en USA;

Sustainable Drainage System, SuDS, en el Reino Unido, etc.) (Fletcher et al., 2014).

Existen numerosas publicaciones sobre la temática de los SUDS (Woods-Ballard et al., 2007; SFPUC, 2010; CIRIA, 2015; SEGAE, 2011), en las que se incluyen una amplia gama de actuaciones que pueden implementarse de forma aislada o combinada, y entre las que cabe citar: instalaciones de aprovechamiento del agua de lluvia, aljibes, cubiertas vegetadas (*green roofs o vegetated roofs*), plantación de árboles, superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, sistemas geocelulares, zonas de biorretención, franjas filtrantes, drenes filtrantes, cunetas vegetadas, depósitos de infiltración, depósitos de detención, estanques de retención y humedales artificiales (*constructed wetlands*). Se trata, en su mayoría, de medidas para reducir de forma significativa la escorrentía generada mediante la desconexión de zonas impermeables (Pitt, Clark & Palmer, 1994, citado por García, 2011) para, principalmente, disminuir la cantidad de escorrentía de lluvia, tanto en términos de volumen como de caudal punta, mejorar la calidad del agua de escorrentía para preservar los cuerpos receptores y provocar beneficios al entorno urbano en cuanto a calidad ambiental y mejora del paisaje (Woods-Ballard et al., 2007).

Numerosas investigaciones se han llevado a cabo sobre la temática de los SUDS, tanto a nivel nacional (Galarza y Garzón, 2005; Álvarez y Celedón, 2012; Torres Santa y Quintero, 2012; Galarza-Molina et al., 2015; Pérez et al., 2016; Jiménez et al., 2016), como internacional (Coombes et al., 2000; Lariyah et al., 2011; O'Sullivan et al., 2012; Lucas et al., 2014). Los objetivos de estas investigaciones se abordan desde perspectivas muy diversas,

desde las meramente descriptivas, hasta las cuantitativas -fundamentalmente hidrológicas e hidráulicas- y cualitativas (calidad de las aguas de escorrentía), pasando por casos de estudio y análisis de elementos concretos de SUDS.

No se han encontrado, sin embargo, demasiadas investigaciones focalizadas en la influencia de los SUDS sobre los coeficientes de escorrentía y sus repercusiones hidrológicas (caudales punta) e hidráulicas (diámetros de las conducciones). En este sentido, cabe destacar los trabajos de Abellán (2013) y López (2015), relativos a casos prácticos de implementación de SUDS en áreas urbanizadas consolidadas, demostrando que con los SUDS se reducen los coeficientes de escorrentía y, consecuentemente, disminuyen los caudales punta y los diámetros de los colectores. Concretamente, en el primer caso (Abellán, 2013), una reducción del 68,57% de coeficiente de escorrentía supuso una disminución del caudal punta del 74,78%, mientras que en el segundo (López, 2015), una reducción del 26,8% del coeficiente de escorrentía se tradujo en una disminución del caudal punta del 38,7% y de, aproximadamente, el 15% de los diámetros de los colectores.

En el presente trabajo se analizan las implicaciones hidrológicas e hidráulicas de la implementación de SUDS en entornos urbanos. Concretamente, se evalúa la influencia de la reducción del coeficiente de escorrentía de una cuenca urbana -que se produce por efecto de los SUDS- en el caudal punta y en las dimensiones del colector de drenaje, así como en el riesgo de inundación.

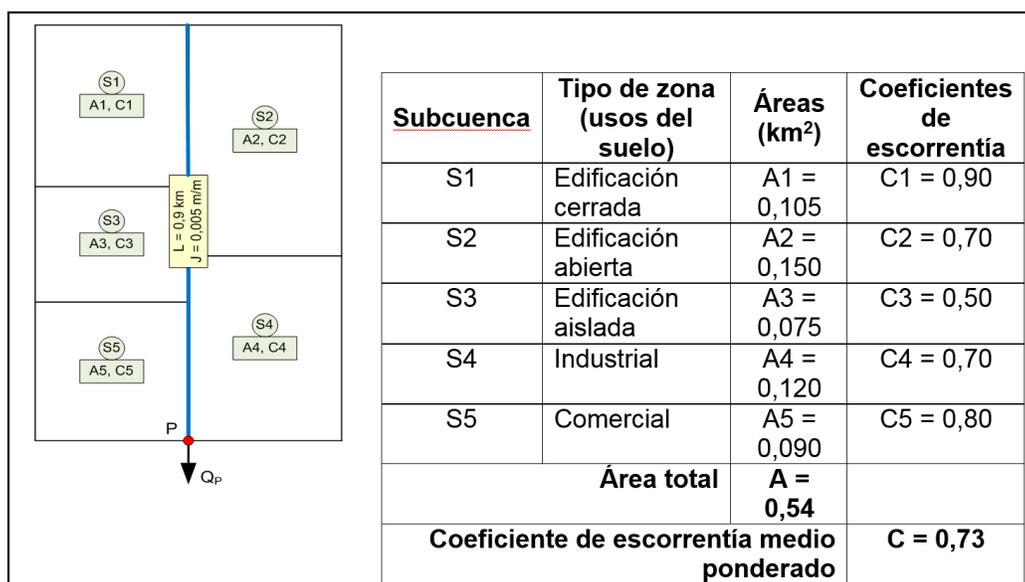
MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la cuenca de estudio

A los efectos del presente análisis, se ha definido una cuenca de estudio consistente en un sector urbano tipo, cuyas características se muestran en la Figura 2. La cuenca tiene un área total de 54 ha y drena a través de un colector general que desagua en el punto P. La longitud (L) de este colector es de 900 m y tiene una pendiente media (J) de 0,005 m/m.

La cuenca se ha dividido en 5 subcuencas homogéneas en función de su tipología edificatoria y, a cada una de ellas, se le ha asignado el coeficiente de escorrentía correspondiente. El coeficiente de escorrentía global de la cuenca se ha obtenido calculando la media ponderada de los coeficientes de escorrentía de las subcuencas (sumatorio del producto de las áreas por su coeficiente de escorrentía, dividido por el área total de la cuenca).

Figura 2. División en subcuencas y características de la cuenca urbana de estudio



Cálculo del caudal punta

Para determinar el caudal en el punto de desagüe de la cuenca (P) se ha empleado el Método Racional, recomendado, entre otros organismos, por el Ministerio de Fomento español (2016). De acuerdo con este

método, el caudal punta correspondiente a un determinado período de retorno, T, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q_p = 0,278 \cdot I \cdot A \cdot C \cdot K_t \quad (1)$$

donde QP [m³/s] es el caudal punta o caudal máximo anual correspondiente al período de retorno, T, en el punto de desagüe de la cuenca; I [mm/h] la intensidad de precipitación correspondiente al período de retorno considerado, para una duración del aguacero, t, igual al tiempo de concentración, T_c, de la cuenca; A [km²] el área de la cuenca drenada; C [adimensional] el coeficiente medio de escorrentía de la cuenca [relación de transformación lluvia-escorrentía] y K_t [adimensional] el coeficiente de uniformidad.

El coeficiente K_t, que tiene en cuenta la falta de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$K_t = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14} \quad (2)$$

donde K_t [adimensional] es el coeficiente de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación y T_c [horas] el tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de concentración se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_c = 0,3 \cdot L^{0,76} \cdot J^{-0,19} \quad (3)$$

donde T_c [horas] es el tiempo de concentración y L [km] y J [m/m] la longitud y la pendiente media del colector, respectivamente.

Por su parte, la intensidad de precipitación, I, depende del periodo de retorno, T [años] y de la duración del aguacero, t [igual al tiempo

de concentración, T_c]. A los efectos del estudio que nos ocupa, se supone que en la zona de estudio existen curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), cuya expresión general es la siguiente:

$$I = a \cdot t^b \quad (4)$$

donde I [mm/h] es la intensidad correspondiente al periodo de retorno T [años], considerado, t [minutos] la duración del aguacero [igual al tiempo de concentración, T_c] y a y b parámetros que dependen, para una determinada localización geográfica, del periodo de retorno. Para nuestro caso de estudio, se ha adoptado un periodo de retorno de 25 años, que sería el deseable para un sistema de drenaje urbano convencional y los valores de los parámetros de la ecuación (4) son: a = 430,39 y b = -0,453

Según la ecuación (1), en una cuenca concreta, de la que se conocen sus características geomorfológicas y pluviométricas [A, T_c (L, J), I (T, t = T_c)], el caudal correspondiente a un determinado periodo de retorno solo podría variar modificando el coeficiente de escorrentía, C. En tal caso, el caudal dado por la ecuación (1) se puede representar como una función lineal de C, de la forma:

$$QP = q \cdot C \quad (5)$$

siendo q [m³/s]:

$$q = 0,278 \cdot I \cdot A \cdot K_t \quad (6)$$

El análisis de dependencias funcionales de la ecuación (6) pone de manifiesto que, para una cuenca dada (área A, cte.; duración del aguacero $t = T_c$, cte.; Kt, constante), q depende del periodo de retorno (T) que se considere. Por tanto, una vez fijado T, q será una constante de la cuenca.

Cálculo del diámetro del colector

Para el dimensionamiento de la sección (diámetro) del colector puede emplearse la fórmula de Manning (Chow, 1994), para flujo permanente y uniforme:

$$Q_P = \frac{1}{n} \cdot J^{1/2} \cdot R_h^{2/3} \cdot S \quad (7)$$

donde Q_P (m^3/s) es el caudal de diseño del colector (caudal punta calculado anteriormente), n (adimensional) el coeficiente de rugosidad, J (m/m) la pendiente geométrica del colector, R_h (m) el radio hidráulico (relación entre el área ocupada por el agua en el colector y el perímetro mojado) y S (m^2) el área ocupada por el agua en el colector.

Para nuestro caso de estudio se ha considerado un colector circular de diámetro D (m) totalmente lleno, pero sin entrar en carga, es decir, funcionando en el límite de lámina libre. Aunque en la práctica no es lo habitual -ya que los colectores se diseñan a sección parcialmente llena (75%-85%)-, a los efectos del análisis que nos ocupa esta simplificación es válida y no desvirtúa los resultados.

El R_h de un colector circular a sección llena es $D/4$, con lo que sustituyendo en la ecuación (7) y ordenando, se tiene que el diámetro del colector es:

$$D = \left(\frac{n}{0,31 \cdot J^{1/2}} \right)^{0,375} \cdot Q_P^{0,375} \quad (8)$$

Introduciendo en la ecuación (8) el valor de Q_P dado por la ecuación (5), se tiene:

$$D = \left(\frac{n}{0,31 \cdot J^{1/2}} \right)^{0,375} \cdot (q \cdot C)^{0,375} \quad (9)$$

Asimismo, suponemos que colector es de hormigón, con lo que $n = 0,013$ (Chow, 1994).

Análisis del riesgo de inundación

Para el análisis del riesgo de inundación supondremos que el colector de drenaje de la cuenca de estudio se ha diseñado para el caudal generado por una precipitación de 10 años de periodo de retorno ($T = 10$ años). El planteamiento, en este caso, sería el del mismo sector urbano de estudio posurbanizado y dotado de una red de drenaje convencional, en el que se implementarían a posteriori los SUDS. La adopción de este periodo de retorno se aproxima a la realidad, en cuanto que es un periodo habitual de diseño para una parte sustancial de los sistemas convencionales de drenaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del coeficiente de escorrentía sobre el caudal punta

Sustituyendo en la ecuación (3) los valores del caso de estudio ($L = 0,9 \text{ km}$ y $J = 0,005 \text{ m/m}$), se obtiene un tiempo de concentración: $T_c = 0,76 \text{ h} = 45,6 \text{ min}$. A su vez, sustituyendo este valor de T_c en la ecuación (2), se obtiene un coeficiente de uniformidad: $K_t = 1,05$.

Para el periodo de retorno de 25 años, sustituyendo valores en la ecuación (4) se obtiene una intensidad: $I = 76,3 \text{ mm/h}$.

Sustituyendo en la ecuación (1) los valores del caso de estudio ($A = 0,54 \text{ km}^2$; $C = 0,73$; $I = 76,3 \text{ mm/h}$; y $K_t = 1,05$), se obtiene un caudal punta: $Q_P = 8,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

De la ecuación (6) se obtiene: $q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$. En la tabla 1 se recogen los valores de q para la cuenca de estudio para diferentes periodos de retorno, T , las intensidades, I , para los periodos de retorno considerados (2, 5, 10, 15, 25 y 50 años) se han calculado con las curvas IDF de la zona de estudio, para una duración del aguacero $t = T_c = 45,6 \text{ min}$.

Tabla 1. Valores q para distintos periodos de retorno, T (en sombreado los valores iniciales del caso de estudio)

| T (años) | K_t | I (mm/h) | A (km ²) | q (m ³ /s) |
|------------|-------|------------|------------------------|-------------------------|
| 2 | 1,05 | 29,5 | 0,54 | 4,7 |
| 5 | 1,05 | 45,1 | 0,54 | 7,1 |
| 10 | 1,05 | 57,4 | 0,54 | 9,1 |
| 15 | 1,05 | 65,2 | 0,54 | 10,3 |
| 25 | 1,05 | 76,3 | 0,54 | 12,0 |
| 50 | 1,05 | 95,8 | 0,54 | 15,1 |

De acuerdo con la relación lineal entre C y Q_p que expresa la ecuación (5), la variación porcentual de C implica la misma variación porcentual de Q_p , ya sean incrementos o decrementos, y sea cual fuere el valor de q . Por tanto, si denotamos como δQ_P y δC las variaciones porcentuales (positivas o negativas) del caudal y del coeficiente de escorrentía, respectivamente, en cualquier cuenca siempre se verifica que:

$$\delta C = \delta Q_P \quad (10)$$

En la tabla 2 se recogen los valores del coeficiente de escorrentía, C , y del caudal, Q_P , junto con los respectivos porcentajes de reducción, δC y δQ_P .

Tabla 2. Valores del coeficiente de escorrentía (C), del caudal punta (Q_p) y de las respectivas reducciones porcentuales (δC y δQ) (en sombreado los valores iniciales del caso de estudio)

| C | δC (%) | Q_P (m ³ /s) | δQ_P (%) |
|------|----------------|---------------------------|------------------|
| 0,73 | - | 8,8 | - |
| 0,66 | 10 | 7,9 | 10 |
| 0,62 | 15 | 7,5 | 15 |
| 0,58 | 20 | 7,0 | 20 |
| 0,55 | 25 | 6,6 | 25 |
| 0,51 | 30 | 6,1 | 30 |
| 0,47 | 35 | 5,7 | 35 |
| 0,44 | 40 | 5,3 | 40 |

Estos resultados difieren ligeramente de los obtenidos por Abellán (disminución de QP del 74,78% para una reducción de C del 68,57%) y por López (disminución de QP del 38,7% para una reducción de C del 26,8%) ya que, en nuestro caso, aplicando la ecuación (10) con las mismas reducciones porcentuales de C se obtienen reducciones del QP del 68,57% y del 26,8%, respectivamente. Procede, entonces, corregir la ecuación (10) introduciendo un coeficiente corrector k, de manera que dicha ecuación adopta la siguiente forma:

$$\delta QP = k \cdot \delta C \quad (10 \text{ bis})$$

donde k es un coeficiente de valor ≥ 1 , que se deberá ajustar en cada caso concreto.

Influencia del coeficiente de escorrentía sobre el diámetro del colector

Sustituyendo los valores del caso de estudio en la ecuación (9), se obtiene la siguiente ecuación que relaciona el coeficiente de escorrentía, C, de la cuenca con el diámetro, D (mm), del colector de drenaje:

$$D = 2.100 \cdot C^{0,375} \quad (11)$$

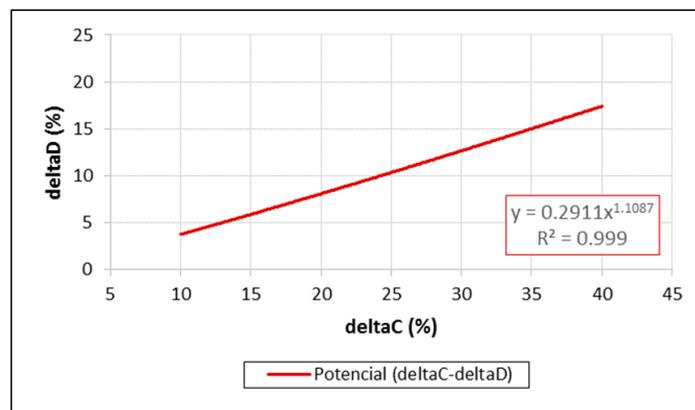
En la tabla 3 se recogen los resultados del cálculo de los diámetros (teóricos), realizado con la ecuación (11), y los porcentajes de reducción de C y D (δC y δD , respectivamente).

La Figura 3 muestra la curva de regresión δC - δD en el caso de estudio.

Tabla 3. Valores del coeficiente de escorrentía (C), del diámetro (D) y de las respectivas reducciones porcentuales (δC y δD) [en sombreado los valores iniciales del caso de estudio]

| C | δC (%) | D (mm) | δD (%) |
|------|----------------|--------|----------------|
| 0,73 | - | 1866 | - |
| 0,66 | 10 | 1797 | 4 |
| 0,62 | 15 | 1755 | 6 |
| 0,58 | 20 | 1712 | 8 |
| 0,55 | 25 | 1678 | 10 |
| 0,51 | 30 | 1631 | 13 |
| 0,47 | 35 | 1582 | 15 |
| 0,44 | 40 | 1544 | 17 |

Figura 3. Curva de regresión δC - δD en el caso de estudio



Como se puede observar en la Figura 3, la curva de regresión se ajusta perfectamente a una función de tipo potencial, cuya ecuación es:

$$\delta D = 0,2911 \cdot (\delta C)^{1,1087} \quad (R^2 = 0,999) \quad (12)$$

La ecuación (12) puede generalizarse para cualquier cuenca urbana, adoptando la forma:

$$\delta D = k_1 \cdot (\delta C)^{k_2} \quad (13)$$

donde k_1 y k_2 son parámetros a determinar en cada caso concreto.

La ecuación (13) permite cuantificar y, en consecuencia, valorar económicamente, la reducción porcentual del diámetro de un colector de drenaje convencional en función de la reducción porcentual del coeficiente de escorrentía de una cuenca urbana. Esta reducción del coeficiente de escorrentía es una consecuencia directa de la implementación de SUDS en la cuenca en cuestión.

Estos resultados, aunque están en órdenes de magnitud análogos, son ligeramente inferiores a los obtenidos por López (disminución de D del 15% para una reducción de C del 26,8%). Así, en nuestro caso, aplicando la ecuación (12), para una reducción del 26,8% de C se obtiene una disminución de D del 11,15%, frente al 15% obtenido por López. En todo caso, los valores obtenidos a partir de casos de estudio reales servirían para ajustar los coeficientes k_1 y k_2 .

Influencia del coeficiente de escorrentía sobre el riesgo de inundación

La probabilidad de ocurrencia de una precipitación de 10 años de periodo de retorno es: .

$$P = \frac{1}{T} = \frac{1}{10} = 0,10 = 10\%$$

Es decir, existe una probabilidad del 10% de que en un año cualquiera (dentro de este periodo), se presenten una o más precipitaciones iguales o superiores a ella. Por tanto, la probabilidad de que la capacidad hidráulica de diseño del colector sea insuficiente al menos una vez un año cualquiera es del 10% o, lo que es lo mismo, el riesgo de inundación por desbordamiento es del 10%.

Entrando en la tabla 1, la intensidad correspondiente al periodo de retorno de 10 años es: $I = 57,4 \text{ mm/h}$, y $q = 9,1$. Sustituyendo valores en la ecuación (5), resulta un caudal punta: $Q_p = 9,1 \cdot 0,73 = 6,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

En una cuenca dada (A y $t = T_c$ constantes conocidas), se puede generar un mismo caudal con una variedad de combinaciones de intensidades y de coeficientes de escorrentía. Este hecho tiene evidentes implicaciones sobre la probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvia y, consecuentemente, sobre el riesgo de inundación. En efecto, combinando y ordenando las ecuaciones (5) y (6), se deduce la siguiente relación entre la intensidad (I) y el coeficiente de escorrentía (C), para el caudal considerado correspondiente el periodo de retorno de 10 años ($Q_p = 6,6 \text{ m}^3/\text{s}$):

$$I = 41,9 \cdot C^{-1} \quad (14)$$

La ecuación (14) permite obtener las intensidades correspondientes a los coeficientes de escorrentía sucesivamente reducidos y, a partir de ellas -utilizando, por ejemplo, las curvas IDF- los respectivos periodos de retorno (T) para la duración del aguacero $t = T_c = 45,6$ minutos, y,

consecuentemente, la probabilidad de ocurrencia en cada caso. En la tabla 4 se recogen los valores obtenidos por aplicación de la ecuación (14) en el caso de estudio.

Tabla 4. Valores del coeficiente de escorrentía (C) y de sus respectivas reducciones porcentuales (δC), intensidades (I), periodos de retorno (T) y probabilidades de ocurrencia (P) correspondientes, con relación al caudal de diseño del colector (Q_{T=10} = 6,6 m³/s)

| C | δC (%) | I (m/h) | T (años) | P (%) |
|------|--------|---------|----------|-------|
| 0,73 | - | 57,4 | 10 | 10,0 |
| 0,66 | 10 | 63,4 | 13 | 7,7 |
| 0,62 | 15 | 67,5 | 16 | 6,3 |
| 0,58 | 20 | 72,2 | 22 | 4,5 |
| 0,55 | 25 | 76,1 | 25 | 4,0 |
| 0,51 | 30 | 82,1 | 30 | 3,3 |
| 0,47 | 35 | 89,1 | 40 | 2,5 |
| 0,44 | 40 | 95,2 | 50 | 2,0 |

La Figura 4 muestra la relación entre las reducciones porcentuales del coeficiente de escorrentía (δC) y las probabilidades de ocurrencia para las intensidades calculadas.

Tal y como se puede observar en la gráfica de la Figura 4, la probabilidad de ocurrencia va disminuyendo exponencialmente a medida que se va reduciendo el coeficiente de escorrentía. Analíticamente, la curva de regresión se formula mediante la siguiente ecuación:

$$P = 10,877 \cdot e^{-0,041 \cdot (\delta C)} \quad R^2 = 0,9886 \quad (15)$$

donde P (%) es la probabilidad de ocurrencia de los eventos de precipitación de las intensidades I, y δC los porcentajes de reducción del coeficiente de escorrentía. La ecuación (15) puede generalizarse, expresándose de la forma:

$$P = k_3 \cdot e^{k_4 \cdot (\delta C)} \quad (16)$$

donde k₃ y k₄ son parámetros a determinar en cada caso concreto.

CONCLUSIONES

Los SUDS reducen el volumen y el caudal punta de la escorrentía urbana, de manera que pueden resolver el problema de la insuficiencia hidráulica de los colectores de la red de drenaje convencional, que no pueden asumir los caudales de escorrentía generados como consecuencia de la impermeabilización del suelo derivada del desarrollo urbano.

Para cualquier cuenca se verifica que las reducciones porcentuales del coeficiente de escorrentía (δC), por efecto de la implementación de SUDS, representan reducciones porcentuales del caudal de escorrentía (δQ) generado en la cuenca, que pueden cuantificarse mediante la siguiente expresión:

$$\delta QP = k \cdot \delta C \quad (k \geq 1)$$

Para cualquier colector de drenaje, la reducción porcentual del coeficiente de escorrentía de la cuenca (δC) implica,

como mínimo, una reducción porcentual del diámetro (δD), que puede cuantificarse mediante una función de tipo potencial de la forma:

$$\delta D = k_1 \cdot (\delta C)^{k_2}$$

donde k_1 y k_2 son parámetros a determinar en cada caso concreto.

En cualquier cuenca urbana, la reducción porcentual del coeficiente de escurrimiento (δC) implica una disminución de la frecuencia o probabilidad de ocurrencia [P (%)] de un determinado evento de precipitación y, por consiguiente, disminuye el riesgo de inundación por desbordamiento del colector de drenaje. Analíticamente, la relación entre ambas variables se puede expresar mediante una función exponencial de la forma:

$$P = k_3 \cdot e^{k_4(\delta C)}$$

donde k_3 y k_4 son parámetros a determinar en cada caso concreto.

Los resultados obtenidos pueden servir de sustento o base para evaluar la implementación de SUDS en casos reales, ya se trate de sectores urbanos pre o posurbanizados. Adicionalmente, estudios futuros podrían complementar este trabajo, que ha sido exclusivamente de tipo técnico, con un análisis económico de construcción y de mantenimiento y conservación de estos sistemas.

REFERENCIAS

Abellán, A. (2013). Sistemas de drenaje urbano sostenible: aplicación práctica a un tramo de la Diagonal de Barcelona. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Álvarez, J. y Celedón, E. (2012). "Evaluación de las capacidades hidráulicas y de retención de contaminantes de un modelo de trinchera de retención construida con una canastilla en PVC (Aquacell) acoplada con capa filtrante en geotextil, arena y grava utilizada como componente del drenaje urbano." Trabajo de grado para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Chow, V.T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colombia.

Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) (2015). The SUDS Manual, London, UK.

Coombes, P. J., Argue, J. R., and Kuczera, G. (2000). "Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD)." Urban Water, 1(4), 335–343.

Fletcher, T.; Shuster, W.; Hunt, W.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.; Mikkelsen, P.; Rivard, G.; Uhl, M.; Dagenais, D. and Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal, 0(0), 1–18.

Galarza, S. y Garzón, F. (2005). "Estudio de viabilidad técnica de los sistemas urbanos de drenaje sostenible para las condiciones tropicales de Colombia." *Epíclidos*, 4(1), 59–70.

Galarza-Molina, S.; Torres, A.; Lara-Borrero, J.; Méndez-Fajardo, S.; Solarte, L. & Gonzales, L. (2015). Towards a constructed wetland/reservoir-tank system for rainwater harvesting in an experimental catchment in Colombia. *Revista Ingeniería y Universidad* 19, 169–185.

García, E. (2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos. Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Georgia Stormwater Management Manual, Vol. 2 (GSMM) (2016). Atlanta Regional Commission, Atlanta, GA, USA.

Jiménez S.L., Martínez J., Muñoz A., Quijano J., Diaz-Granados M., Camacho L., Rodríguez J., Maestre A., Pitt R. (2016). Development of a multiscale methodology for sustainable urban drainage systems planning. Case study: Bogotá, Colombia 9th Novatech proceedings. June 28-July 1. http://www.novatech.graie.org/a_progr_sessions.php#D1

Lariyah, M. S., Mohd Nor, M. D., Mohamed Roseli, Z. A., Zulkefli, M., and Amirah Hanim, M. . (2011). "Application of Water Sensitive Urban Design at Local Scale in Kuala Lumpur." *Porto Alegre, Brazil*, 1–14.

López, R. (2015). Proyecto de construcción de un sistema de drenaje sostenible como

alternativa al convencional existente en el Sector NP-i7 de Ibi. Trabajo Fin de Grado para la obtención del Título de Grado en Ingeniería Civil. Universidad de Alicante, España.

Lucas, R., Earl, E. R., Babatunde, A. O., and Bockelmann-Evans, B.N. (2014). "Constructed wetlands for stormwater management in the UK: a concise review." *Civil Engineering and Environmental Systems*, 0(0), 1–18

Ministerio de Fomento (2016). Norma 5.2 - IC Drenaje Superficial. BOE núm. 60 (10/03/2016).

O'Sullivan, J. J., Bruen, M., Purcell, P. J., and Gebre, F. (2012). "Urban drainage in Ireland – embracing sustainable systems." *Water and Environment Journal*, 26(2), 241–251.

Perales, S. (2014). Curso de Gestión Integral del agua de lluvia en entornos urbanos: Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS). Instituto Didactia, Almería, España.

Perez Murillo G., Ferrans Ramírez P., Rey Guerra C., Diaz-Granados Ortiz M., Rodríguez Sánchez J., Correal Núñez M. (2016). Assessment of Runoff Quantity And Quality For Extensive Green Roof Modular Systems. 9th Novatech proceedings. June 28-July 1. http://www.novatech.graie.org/a_progr_sessions.php#D1

San Francisco Public Utilities Commission (SFPUC) (2009). San Francisco Stormwater Design Guidelines. San Francisco, CA, USA.

Subdirección de Ecurbanismo y Gestión Ambiental Empresarial (SEGAE) (2011). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*.

Documento Técnico de Soporte SUDS. Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Colombia.

Torres, A.; Santa, M. y Quintero, J. (2012). Desempeño hidráulico de un modelo de trinchera de retención utilizada como

componente del drenaje urbano. Revista Acodal, 229(1), 19-27.

Woods-Ballard, P.; Kellagher, R.; Martin, P.; Jefferies, C.; Bray, R. y Shaffer, P. (2007). CIRIA: The SUDS Manual. Construction Industry Research and Information Association, London, UK.