

# ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTÁNDARES DE EMISIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO VOLUMÉTRICO DE TANQUES DE TORMENTA

Ignacio Andrés-Doménech, Juan B. Marco Segura, Francisco J. Vallés Morán, Eduardo Albentosa Hernández

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA)  
Área de Hidráulica e Hidrología, Universidad Politécnica de Valencia (UPV)  
Camino de Vera s/n. 46022 Valencia, España  
igando@hma.upv.es

**Resumen:** El impacto ambiental sobre los medios receptores que provocan los vertidos de escorrentías urbanas desde un tanque de tormentas para el control de la contaminación puede enfocarse de dos formas diferentes: estableciendo los denominados estándares de emisión (Emission Standards, ES) o bien los objetivos de calidad ambiental (Environmental Quality Standards, EQS). El primer nivel en cuanto a objetivos de protección lo constituyen los estándares de emisión. Con ellos se estudian e imponen restricciones a los vertidos, evaluando su frecuencia, volumen, carga contaminante, etc. Las más habituales hacen referencia a la frecuencia de los vertidos y a la reducción del volumen de escorrentía vertido al medio receptor. El artículo presenta el desarrollo de un modelo analítico probabilístico para el análisis de estándares de emisión en un tanque de tormentas para el control de la contaminación procedente de escorrentías urbanas. Los resultados obtenidos se aplican y se contrastan mediante simulación matemática en una cuenca de la ciudad de Valencia. Finalmente, se sintetizan en ábacos que proporcionan el valor del estándar de emisión alcanzado en función de los dos parámetros básicos de diseño del tanque: su volumen y el caudal derivado a depuración.

## INTRODUCCIÓN

El control de las aguas generadas en entornos urbanos es una cuestión que se remonta a las civilizaciones más antiguas. A principios del siglo XX, los sistemas de saneamiento urbano comienzan a configurarse de forma similar a la actual. En las redes unitarias se pretende enviar a tratamiento la mayor cantidad de flujo posible; en tiempo de lluvia, cuando se supera la capacidad de tratamiento de la planta depuradora, así como la de los colectores interceptores que conducen el agua a la misma, el exceso suele ser vertido directamente en el medio receptor, generando las descargas de sistemas unitarios (DSU). En un principio, se pensó que si estas descargas cumplían con ciertas restricciones de dilución podían ser perfectamente asumidas por el medio receptor. No obstante, hacia 1960, los vertidos procedentes de escorrentías urbanas se revelan como una de las principales causas de la degradación de los cuerpos de agua receptores, sobre todo aguas superficiales continentales

por su menor capacidad de autodepuración. Es a partir de entonces cuando se estudia el problema seriamente y se plantean métodos de control y tratamiento de las DSU, resultando en la introducción de criterios medioambientales en las pautas de diseño de sistemas de drenaje y saneamiento urbanos (Field and Lager, 1975).

Los depósitos de retención de aguas de tormenta son elementos eficaces para paliar los efectos de los vertidos ocasionados por las escorrentías urbanas en tiempo de lluvia al medio receptor. Su uso está hoy en día bastante extendido; sin embargo, existe una gran dispersión de directrices, algunas de ellas incluso obsoletas, para la determinación del volumen óptimo de almacenamiento. No en vano, se dan en el problema una serie de condicionantes locales que tienen una gran influencia en el desarrollo de dichas metodologías, redundando en la dificultad de dotarlas de un carácter universal. La caracterización estocástica del régimen de lluvia, fenómeno inicial del proceso, es la que marca sin duda el desarrollo de un determinado méto-

do, ya sea este probabilístico, de evento tipo, de simulación continua o una versión simplificada derivada de alguno de los anteriores. Consecuentemente, aunque el planteamiento metodológico pueda seguir ciertas pautas generales, incluso con elementos comunes entre métodos, el desarrollo del mismo y, por supuesto, los resultados obtenidos, no son en absoluto generalizables (Andrés-Doménech y Marco, 2008).

El análisis pasa, en aras del cumplimiento de las exigencias de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE y de toda la legislación que de ella emana, por el establecimiento de un objetivo de protección u objetivo de calidad en el medio receptor, puesto que de ello depende el volumen de depósito. El impacto ambiental sobre los medios receptores que provocan los vertidos desde un tanque de tormentas para el control de la contaminación puede enfocarse de dos formas diferentes (CEDEX, 2007), estableciendo los denominados estándares de emisión (Emission Standards, ES) o bien los objetivos de calidad ambiental (Environmental Quality Standards, EQS).

El primer nivel en cuanto a objetivos de protección lo constituyen los estándares de emisión. Con ellos se estudian e imponen restricciones a los vertidos, evaluando su frecuencia, volumen, carga contaminante, etc. Existen y se utilizan diferentes formas prácticas de fijar un estándar de emisión. Las más habituales hacen referencia a la frecuencia de los vertidos y a la reducción del volumen de escorrentía o carga contaminante vertidos al medio receptor. El análisis centrado en estándares de emisión presenta la ventaja de resultar en metodologías fácilmente aplicables, pero adolece de considerar al medio receptor en sí, por lo que no discrimina los impactos que las descargas producen en el mismo. Por este motivo, se plantea el segundo nivel en objetivos de protección que es el que corresponde a los objetivos de calidad ambiental (EQS). Los EQS son objetivos que se definen no sobre los propios vertidos sino directamente sobre el medio receptor. Se evalúa entonces la capacidad del medio para adaptarse a los contaminantes que recibe, especificando además el nivel de tolerancia del impacto en función del medio receptor.

En cualquier caso, el requisito anterior no exige de analizar en primera instancia la respuesta del sistema con el nivel ES de objetivos de protección. En primer lugar, porque los objetivos ES realizan una primera aproximación de cara a establecer la eficiencia que se consigue con un determinado depósito; en segundo, porque, siendo conscientes de las limitaciones, los estándares de emisión pueden ser por sí mismos una buena herramienta para evaluar la eficiencia del sistema

(Lau J., *et al.*, 2002), habida cuenta de la incertidumbre y los grados de libertad que se incorporan en el segundo nivel al considerar al medio receptor como un elemento más del sistema. Las ideas anteriores deben, no obstante, conjugarse con las exigencias de la Directiva Marco según la cual ya no es factible admitir un vertido en función de sus características intrínsecas sino que debe evaluarse en función del impacto que genera sobre el medio receptor de acuerdo con los objetivos medioambientales a alcanzar. De esto se deduce que es imperativo que el análisis llegue al segundo nivel en objetivos de protección (EQS).

En este artículo se aborda el análisis que corresponde al primer nivel de objetivos de protección, esto es, los estándares de emisión. El artículo presenta un modelo analítico probabilístico para la evaluación de estándares de emisión en un tanque de tormentas para el control de la contaminación. Los resultados obtenidos se aplican y se contrastan mediante simulación matemática en una cuenca de la ciudad de Valencia.

---

## CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO

---

Los métodos analíticos probabilísticos de dimensionamiento de tanques de tormenta para el control de la contaminación tienen como punto de partida la caracterización del régimen pluviométrico local. La metodología desarrollada requiere datos pluviométricos de alta resolución y una serie relativamente larga con objeto de poder caracterizar correctamente la separación temporal entre eventos de lluvia  $S$  (duración del tiempo seco), el volumen de evento  $V$  y la duración de éstos  $B$ . Las cuatro etapas fundamentales del análisis del régimen de eventos de lluvia son la validación de los datos, la identificación de eventos de precipitación estadísticamente independientes, el análisis de la dependencia temporal y de la dependencia entre variables y finalmente el ajuste de las funciones de densidad de probabilidad de las variables seleccionadas. Antes de acometer el análisis estadístico, la serie continua de registros pluviométricos original debe separarse en realizaciones estadísticamente independientes (proceso de Poisson). Los resultados obtenidos en Valencia demuestran una separación crítica de evento de  $s_0 = 22$  horas; esto es, dos pulsos de lluvia que disten en el tiempo más de este valor pertenecen automáticamente a eventos de precipitación diferentes (Andrés-Doménech y Marco, 2008). Posteriormente, el

Variable	Función de distribución seleccionada	Parámetros
Separación entre eventos	Exponencial $F_S(s) = 1 - e^{-\beta s}$	$\beta = 0.00522 \text{ h}^{-1}$
Duración de evento	Exponencial $F_B(b) = 1 - e^{-\lambda b}$	$\lambda = 0.0492 \text{ h}^{-1}$
Volumen de evento	Pareto $F_V(v) = 1 - \left(1 - \kappa \frac{v}{\alpha}\right)^{1/\kappa}$	$\kappa = -0.411$ $\alpha = 8.4605 \text{ mm}$

**Tabla 1.** Funciones de distribución de las variables del régimen de eventos de precipitación para la ciudad de Valencia

análisis de la correlación temporal ratifica la independencia de los eventos entre sí; además, la correlación entre las variables  $V$ ,  $B$  y  $S$  resulta muy poco significativa, por lo que se adopta como válida la independencia entre éstas.

Tras la identificación de las tormentas independientes en la serie continua, se procede con el ajuste de las funciones de densidad de la separación temporal entre eventos (distribuida exponencialmente como corresponde a una variable que sigue un proceso de Poisson), el volumen de evento  $V$  y la duración de éste  $B$ . El análisis realizado a la serie pluviométrica de Valencia (serie 1990-2006 del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar en Valencia), pone de manifiesto que los modelos exponenciales ampliamente utilizados en la literatura desde que se empezara a estudiar la problemática (DiToro and Small 1979) hasta las publicaciones más recientes (Adams and Papa, 2000) son válidos para las variables temporales ( $S$  y  $B$ ) pero no son en absoluto satisfactorios para la variable volumen de evento, por lo que se impone la búsqueda y elección de otras alternativas (Balistrocchi *et al.*, 2008). La densidad de probabilidad que se observa cerca del origen hace postular otras funciones de densidad candidatas, como Weibull, Gamma-2, Lognormal o Pareto. Para las características del clima de Valencia, el modelo de Pareto reproduce con gran acierto la población estudiada (Andrés-Doménech y Marco, 2008). En la Tabla 1 se recogen los resultados obtenidos.

## METODOLOGÍA

### El sistema de drenaje urbano

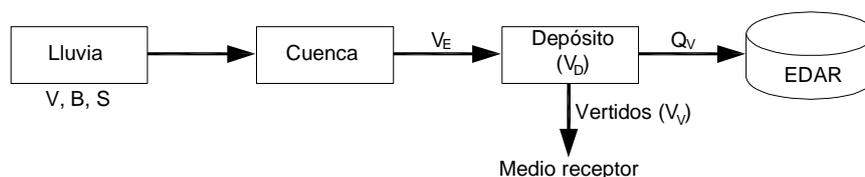
Con el alcance que corresponde al nivel de objetivos ES, el sistema en que se basa el análisis

se estructura fundamentalmente alrededor de dos grandes procesos. El primero de ellos es la producción de escorrentía en la cuenca urbana. El segundo se refiere a la respuesta del propio depósito en el sistema en cuanto a la caracterización de los vertidos que se producen al medio receptor en función del volumen del propio depósito  $V_D$  y del caudal que se permita derivar en continuo a la EDAR,  $Q_V$  (Figura 1).

A priori, no puede asegurarse que sea operacionalmente factible considerar un caudal de vaciado  $Q_V$  simultáneo al episodio de precipitación. En efecto, esto dependerá de la capacidad de admisión de la planta depuradora. No obstante, para dotar de la máxima generalidad a los resultados, se plantea un análisis genérico en que la eficiencia del sistema se confía tanto al volumen de depósito  $V_D$  como a la capacidad de enviar directamente a la EDAR cierto caudal controlado desde el depósito,  $Q_V$ . Por otra parte, nótese que la variable  $Q_V$  puede incluso asemejarse a la tasa de infiltración de una balsa de retención-infiltración, por lo que la metodología desarrollada es fácilmente extrapolable a este otro supuesto en un sistema separativo de pluviales.

### Formulación del problema probabilístico

A partir de la teoría de las funciones de distribución derivadas (ver, por ejemplo, Benjamin and Cornell, 1970), se obtienen las relaciones que gobiernan la estadística de la eficiencia del sistema en términos de las expresiones y leyes que describen el régimen de precipitación y la producción de escorrentía en la cuenca, así como de la configuración de las alternativas de control de la escorrentía (almacenamiento – depósito – y tratamiento – EDAR).



**Figura 1.** Conceptualización del sistema para el análisis de estándares de emisión

Uso	$k$	$A_k$	$a_k$	Umbral de escorrentía $P_{0k}$ (mm)
Grandes zonas pavimentadas	1	26.73	0.3884	1
Edificación de alta densidad	2	20.92	0.3040	4
Edificación de baja densidad	3	13.16	0.1912	18
Zonas verdes	4	8.01	0.1164	70

**Tabla 2.** Distribución de usos del suelo en la cuenca piloto y parámetro de producción

El punto de partida para la obtención de los indicadores de eficiencia buscados lo constituyen las funciones de distribución que caracterizan el régimen de eventos de precipitación (Tabla 1), esto es, el volumen de evento  $V$ , la duración de evento  $B$  y la separación entre eventos (duración del tiempo seco)  $S$ , y sus funciones de densidad respectivas  $f_V(v)$ ,  $f_B(b)$  y  $f_S(s)$ . En la cuenca, y de cara a las evaluaciones volumétricas que se plantean, la transformación lluvia-escorrentía queda definida matemáticamente con el modelo de producción de escorrentía  $v_E = v_E(v)$ , a partir del cual se obtiene la función de densidad de dichos volúmenes de escorrentía  $f_{V_E}(v_E)$  y por último se deduce el valor esperado del volumen de escorrentía generado por evento,  $E(V_E)$ . El eslabón siguiente del análisis consiste en caracterizar estadísticamente el régimen de vertidos  $V_V$ , a partir de su expresión general con las entradas al sistema,  $v_V = v_V(v, b, s)$ . Con dicha transformación, debe obtenerse la función de densidad derivada de los volúmenes vertidos al medio,  $f_{V_V}(v_V)$ , y de ésta, deducir el valor esperado del volumen vertido por evento,  $E(V_V)$ . Con la expresión de  $E(V_V)$  y la obtenida para  $E(V_E)$ , se deduce, para cada par de diseño del tanque ( $V_D, Q_V$ ), la expresión del indicador de eficiencia volumétrica que establece el ratio de la escorrentía retenida respecto de la producida:

$$EV(V_D, Q_V) = 1 - E(V_V) / E(V_E). \quad (1)$$

Para completar el análisis se deduce igualmente el indicador de eficiencia eventual, probabilidad de que en un evento no se produzca vertido. Este indicador representa el ratio a largo plazo de eventos retenidos:

$$EN(V_D, Q_V) = 1 - p(V_V > 0). \quad (2)$$

### Validación mediante simulación matemática

Los resultados analíticos obtenidos del desarrollo de la metodología planteada se contrastan a partir de los obtenidos mediante la simulación continua de la serie histórica de lluvia en una cuenca piloto seleccionada en la ciudad de Valencia. Se trata de una cuenca situada en la cabecera de uno de los grandes ejes de drenaje de

la ciudad, el colector Norte-Cauce que vierte sus aguas a la dársena interior del puerto. La cuenca en cuestión drena la margen derecha de la avenida de Pío XII, con un total de 68.8 ha y un tiempo de concentración  $t_C = 30$  minutos. Con los resultados de la simulación de los 17 años de registros pluviométricos, se obtienen, para los diversos escenarios analizados, los indicadores EV y EN con el fin de establecer el grado de bondad de las expresiones analíticas. Las simulaciones se han efectuado con el software comercial Infoworks CS del Wallingford Institute.

La red cuenta con un total de 562 tramos de colector que suman 13.39 km y 565 pozos de registro, lo cual supone un promedio de uno cada 23.7 m. Por otra parte, la distribución de usos del suelo en la cuenca para la estimación de los correspondientes parámetros de infiltración se ha realizado conjugando por una parte la información recogida en el PGOU de la ciudad y por otra las directrices recogidas en "Normativa para obras de saneamiento de la ciudad de Valencia" (2004) del Servicio del Ciclo Integral del Agua. Para cada uso en la cuenca se define su ratio adimensional de área como  $a_k = A_k/A$ , donde  $A$  es el área total de la cuenca (68.82 ha) y  $A_k$  el área que representa el uso  $k$  dentro de la misma (Tabla 2). Además, cada uso viene caracterizado desde el punto de vista de la infiltración por su umbral de escorrentía,  $P_{0k}$  (González, 2001).

## MODELO DE PRODUCCIÓN DE ESCORRENTÍA

### Elección del modelo

El primer paso en la derivación de las expresiones probabilísticas que describen la respuesta del sistema es la definición del modelo de producción de escorrentía  $v_E = v_E(v)$ .

Los modelos de coeficiente de escorrentía con abstracción inicial (Adams B.J. y Papa F., 2000) o el modelo de Horton (Guo Y., Adams B.J., 1998) se han utilizado ampliamente para modelar la producción de escorrentía en cuencas urbanas. El primero es demasiado simplista, máxime cuando el problema no se ciñe a un

evento con un determinado período de retorno, sino al régimen completo de eventos de lluvia, estando en consecuencia el coeficiente de escorrentía sujeto a una variabilidad mucho mayor. El segundo presenta el problema de depender de tres parámetros, con la consiguiente incertidumbre en la estimación de éstos. Un modelo universalmente aceptado, que presenta además la ventaja de tener un solo parámetro (asumiendo que el parámetro que relaciona el umbral de escorrentía con el almacenamiento en el suelo es igual a 0.2), con una representación suficiente de la realidad en entorno urbano, es el modelo del SCS. Estrictamente, se trata de un modelo de pérdidas globales y no sólo de infiltración, aunque en medio urbano, esta diferenciación es despreciable. Pero el motivo fundamental de la elección es que dicho modelo ha sido calibrado en el ámbito de la ciudad de Valencia (González, 2001). Bajo estas premisas, se adopta el modelo de producción de escorrentía con las expresiones que se detallan a continuación. Cada una de las  $N$  subáreas  $A_k$  está asociada al uso de suelo  $k$  con un umbral de escorrentía  $P_{0k}$ . Así pues, el volumen de escorrentía generado en la cuenca será:

$$v_E(v) = \sum_{k=1}^N a_k E_k \quad \text{con} \quad \begin{cases} E_k = 0 & v \leq P_{0k} \quad k = 1, \dots, N \\ E_k = \frac{(v - P_{0k})^2}{v + 4P_{0k}} & v > P_{0k} \quad k = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

Nótese que  $P_{01} < \dots < P_{0k} < \dots < P_{0N}$ . En el caso concreto de la aplicación práctica que se adjunta,  $N=4$  y los ratios  $a_k$  y los umbrales  $P_{0k}$  son los que se recogen en la Tabla 2.

### Función de densidad de los volúmenes de escorrentía

Una vez establecido el modelo de producción de escorrentía, la función de densidad de probabilidad de los volúmenes de escorrentía  $V_E$  puede derivarse a partir de la correspondiente a los volúmenes de evento de precipitación  $V$ . Mientras el volumen de precipitación no supera el umbral mínimo de escorrentía  $P_{01}$ , no se produce escorrentía, por lo que:

$$\begin{aligned} p(V_E = 0) &= p(V \leq P_{01}) = \int_{v=0}^{P_{01}} f_V(v) dv \\ &= 1 - \left(1 - \frac{\kappa P_{01}}{\alpha}\right)^{1/\kappa}. \end{aligned} \quad (4)$$

Por otra parte, si se supera el umbral  $P_{01}$ ,

$V_E > 0$  y la función de distribución de  $V_E$  será:

$$\begin{aligned} p(V_E \leq v_E) &= \int_0^{v_E} f_{V_E}(v_E) dv_E = p(V_E = 0) \\ &+ \int_{P_{01}}^{v_E} f_V(v) dv = 1 - \left(1 - \frac{\kappa v}{\alpha}\right)^{1/\kappa}, \end{aligned} \quad (5)$$

formulada en términos implícitos de  $v = v(v_E)$ . La función de densidad de los volúmenes de escorrentía, también en los mismos términos implícitos, será por tanto:

$$\begin{aligned} f_{V_E}(v_E) &= \frac{d}{dv_E} F_{V_E}(v_E(v)) = \\ &= \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\kappa v}{\alpha}\right)^{1/\kappa - 1} \cdot \frac{dv}{dv_E} \\ &= \frac{\frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\kappa v}{\alpha}\right)^{1/\kappa}}{\sum_{k=1}^N a_k \frac{d}{dv} E_k(v)}, \end{aligned} \quad (6)$$

con un impulso de probabilidad para  $v_E = 0$  dado por la expresión de  $p(V_E = 0)$ .

Finalmente, el valor esperado del volumen de escorrentía por evento será:

$$\begin{aligned} E(V_E) &= 0 \cdot f_{V_E}(V_E = 0) + \int_0^{\infty} v_E f_{V_E} dv_E \\ &= \frac{1}{\alpha} \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\kappa v}{\alpha}\right)^{1/\kappa - 1} \sum_{k=1}^N a_k E_k(v) dv. \end{aligned} \quad (7)$$

## CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE VERTIDOS

### Modelo de eventos aislados

#### Modelo de pulsos rectangulares

El volumen de escorrentía por evento que se consigue controlar con el tanque de tormenta consta de dos factores. Por una parte, el volumen que la capacidad del depósito  $V_D$  permite retener y por otra, el volumen que se puede derivar a tratamiento durante el evento, con un caudal  $Q_V$ . La primera aproximación que se desarrolla adopta las siguientes hipótesis: la respuesta al pulso rectangular de lluvia de volumen  $V$  y duración  $B$  es un pulso rectangular de escorrentía de volumen  $V_E$  y duración  $B + t_C$  siendo  $t_C$  el tiempo de concentración de la cuenca; en rigor, la duración del pulso de escorrentía debe ser  $B_{N+t_C}$ , siendo  $B_N$  la duración de la lluvia neta ( $B$  menos el tiempo de encharcamiento) aunque, como se recoge en la literatura (Adams B. J. y Papa F., 2000), es habitual prescindir de

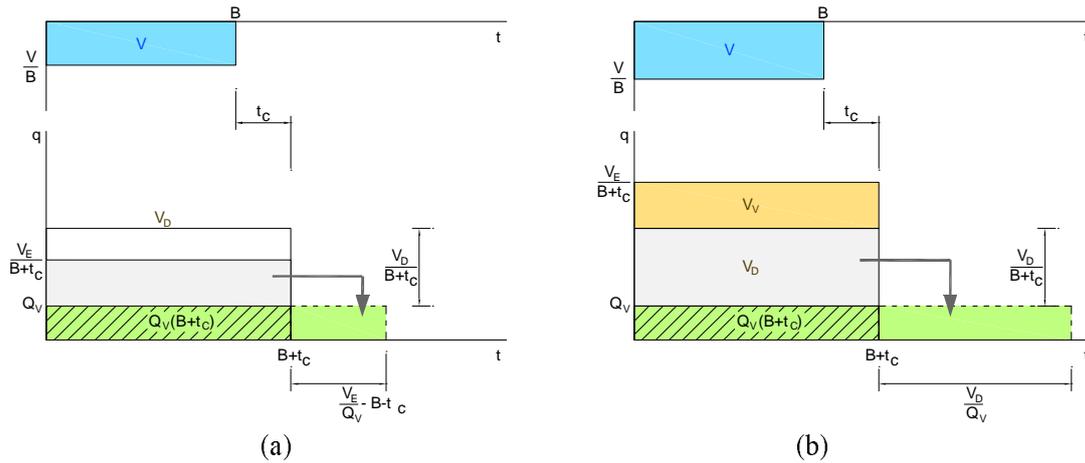


Figura 2. Modelo de pulsos rectangulares (a) sin vertido y (b) con vertido

este matiz en el ámbito de la hidrología urbana. Por otra parte, el caudal derivado a tratamiento es constante, de valor  $Q_V$ , de modo que durante el evento, el caudal derivado es  $Q_V(B+t_C)$  y concluido éste, el volumen retenido se vacía al mismo ritmo constante.

En la Figura 2 se esquematiza el modelo de pulsos rectangulares con las hipótesis adoptadas. La evaluación de la eficiencia volumétrica y de la reducción del número de vertidos necesita a continuación del desarrollo de la función de densidad del volumen vertido,  $V_V$ . Según el modelo de pulsos rectangulares adoptado, resulta:

$$\begin{cases} V_V = 0 \\ V_V = V_E(V) - Q_V(B+t_C) - V_D \end{cases} \quad \begin{cases} V_E(V) - Q_V(B+t_C) \leq V_D \\ V_E(V) - Q_V(B+t_C) > V_D \end{cases} \quad (8)$$

A partir de la expresión anterior,

$$\begin{aligned} p(V_V = 0) &= p(V_E \leq V_D + Q_V(B+t_C)) \\ &= p(V_E = 0) + \int_{b=0}^{\infty} \int_{v_E=0}^{V_D+Q_V(b+t_C)} f_{V_E}(v_E) f_B(b) dv_E db \\ p(V_V = 0) &= p(V_E = 0) + \int_{b=0}^{\infty} \int_{v=P_{01}}^{V_{DQ}^*} \frac{1}{\alpha} \\ &\quad \left(1 - \frac{\kappa v}{\alpha}\right)^{1/\kappa-1} \lambda e^{-\lambda b} dv \cdot db. \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $V_{DQ}^*$  es la "lluvia generadora de  $V_D + Q_V(b+t_C)$ ", volumen de lluvia que genera un volumen de escorrentía exactamente igual

al volumen no vertido, esto es,  $V_E(V_{DQ}^*) = V_D + Q_V(b+t_C)$ . De este modo, desarrollando la expresión anterior, se deduce el indicador de eficiencia eventual, probabilidad de que en un evento no se produzca vertido.

$$EN(V_D, Q_V) = 1 - p(V_V > 0) = 1 - \int_{b=0}^{\infty} \lambda e^{-\lambda b} \left(1 - \frac{\kappa V_{DQ}^*}{\alpha}\right)^{1/\kappa} db. \quad (10)$$

Por otra parte, para evaluar el indicador de eficiencia volumétrica, se obtiene la expresión del valor esperado del volumen vertido por evento,  $E(V_V)$  a partir de la función de densidad de  $V_V$ . La función de distribución será:

$$\begin{aligned} F_{V_v}(v_V) &= p(V_v \leq v_V) = \\ 1 - p(V_v > v_V) &= \\ 1 - p(v_E \geq v_V + Q_V(b+t_C) + V_D) &= \\ 1 - \int_{b=0}^{\infty} \int_{v_E=v_V+V_D+Q_V(b+t_C)}^{\infty} f_{V_E}(v_E) f_B(b) dv_E db &= \\ 1 - \int_{b=0}^{\infty} \int_{v=v^*}^{\infty} \frac{1}{\alpha} \left(1 - \kappa \frac{v}{\alpha}\right)^{1/\kappa-1} \lambda e^{-\lambda b} dv \cdot db & \end{aligned} \quad (11)$$

Con  $V^*$  tal que

$$V_E(V^*) = v_V + V_D + Q_V(b+t_C)$$

y por tanto,

$$F_{V_v}(v_V) = 1 - \int_{b=0}^{\infty} \lambda e^{-\lambda b} \left(1 - \kappa \frac{v^*}{\alpha}\right)^{1/\kappa} db. \quad (12)$$

Con la expresión de la función de distribución de los volúmenes vertidos se estima el valor esperado del volumen vertido por evento y, a partir de éste, el indicador de eficiencia volumétrica (relación entre la escorrentía retenida respecto de la producida) queda finalmente:

$$EV(V_D, Q_V) = 1 - \frac{E(V_V)}{E(V_E)} = 1 - \frac{\int_0^\infty v_V f_{v_V}(v_V) dv_V}{E(V_E)} \quad (13)$$

### Modelo de pulsos triangulares

Para analizar la influencia que tiene en los resultados la forma del pulso de respuesta del sistema, se replantea el modelo en términos de pulsos de respuesta triangulares, más aproximados a la realidad que los anteriores, con las siguientes hipótesis: la respuesta al pulso rectangular de lluvia de volumen  $V$  y duración  $B$  es un pulso triangular de volumen de escorrentía  $V_E$  y duración  $B + t_C$  siendo  $t_C$  el tiempo de concentración de la cuenca (con el mismo matiz respecto del tiempo de encharcamiento realizado anteriormente); el caudal derivado a tratamiento es como máximo de valor  $Q_V$ , adaptándose el inicio y el final del vaciado a las ramas ascendente y descendente del pulso triangular. Según el modelo de pulsos triangulares adoptado, resultará:

si  $Q_V \geq 2V_E / (B + t_C)$  entonces, no se produce vertido ( $V_V = 0$ ) y si  $Q_V < 2V_E / (B + t_C)$  entonces,

$$\begin{cases} V_V = 0 \\ V_V = V_E(V) - Q_V(B + t_C) \left(1 - \frac{B + t_C}{4V_E} Q_V\right) - V_D \end{cases}$$

$$V_E(V) - Q_V(B + t_C) \left(1 - \frac{B + t_C}{4V_E} Q_V\right) \leq V_D$$

$$V_E(V) - Q_V \left(B + t_C \left(1 - \frac{B + t_C}{4V_E} Q_V\right)\right) > V_D \quad (14)$$

Con estas hipótesis en la formulación del pulso respuesta, se aborda el mismo desarrollo probabilístico que con el modelo de pulsos rectangulares para la obtención analítica de las eficiencias  $EV(V_D, Q_V)$  y  $EN(V_D, Q_V)$  (Figura 3).

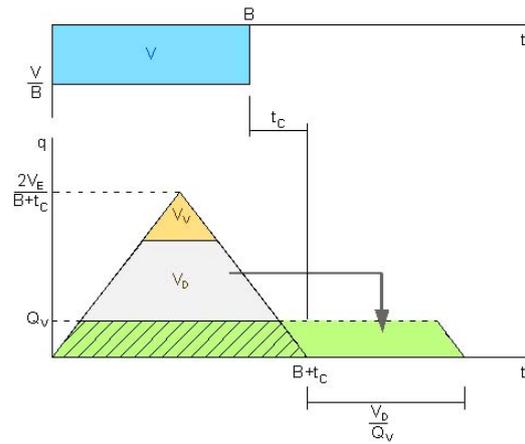


Figura 3. Modelo de pulsos triangulares. Caso general  $V_V > 0$

### Resultados y validación

La validación de los resultados analíticos anteriores se efectúa mediante comparación con los obtenidos de la simulación de los 464 eventos que componen la serie histórica en distintos escenarios  $(V_D, Q_V)$ . Para la simulación de cada escenario, se obtiene el valor muestral de ambos indicadores de eficiencia:

$$\overline{EV}(V_D, Q_V) = 1 - \sum_{j=1}^{464} V_{Vj} \sum_{j=1}^{464} V_{Vj} \sum_{j=1}^{464} V_{Ej}, \quad (15)$$

donde  $V_{Vj}$  es el volumen vertido en la simulación del evento  $j$  y  $V_{Ej}$  el volumen de escorrentía que genera dicho evento. Del mismo modo,

$$\overline{EN}(V_D, Q_V) = 1 - \sum_{j=1}^{464} \delta_j \left/ \sum_{j=1}^{464} \delta_j \right.$$

donde

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & V_{Vj} > 0 \\ 0 & V_{Vj} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

En las Figuras 4 y 5 se recogen los resultados de los modelos analíticos y los obtenidos mediante la simulación de la serie histórica. Los resultados analíticos se han evaluado numéricamente en entorno Matlab.

En el caso del escenario con  $Q_V = 0$  (se confía la eficiencia del sistema exclusivamente a la capacidad de almacenamiento del depósito) la validación de los resultados analíticos con los obtenidos de la simulación es muy satisfactoria, fruto del balance exclusivamente volumétrico realizado (Figura 4). Cuando se considera un caudal de vaciado  $Q_V$  (y por tanto entra en juego la variable  $b$ , duración del evento de lluvia) los resultados analíticos pierden cierta calidad respecto

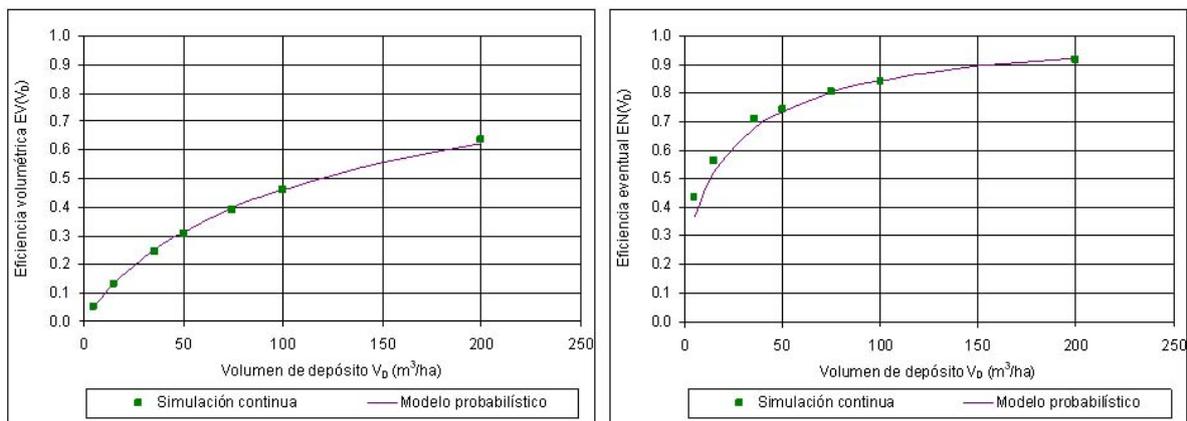


Figura 4. Resultados y validación con los resultados de la simulación para el escenario  $Q_V = 0$

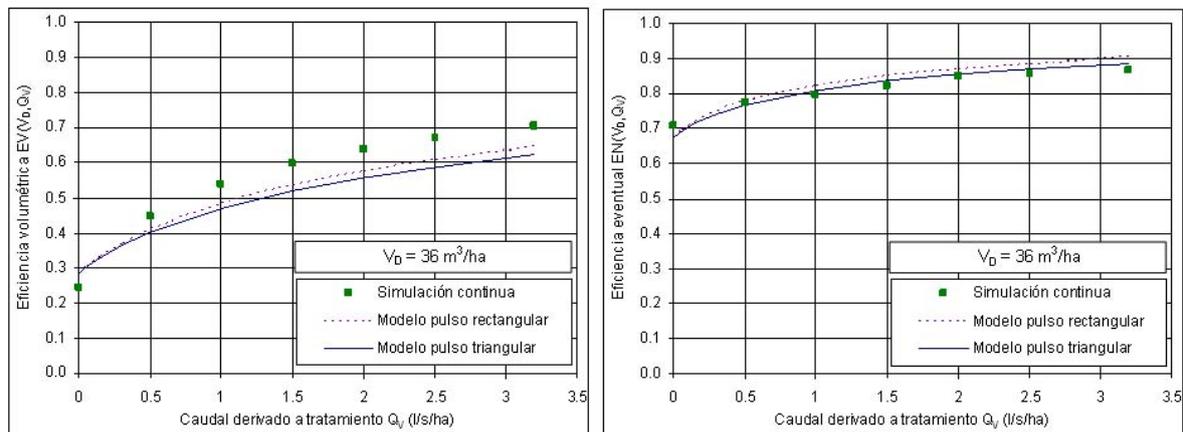


Figura 5. Resultados y validación con los resultados de la simulación para distintos escenarios con  $Q_V > 0$

de los simulados, aunque siguen reproduciendo acertadamente la respuesta del sistema. Se observan, sin embargo, ligeras discrepancias entre el modelo de pulsos rectangulares y el de pulsos triangulares (Figura 5).

Aunque no se observan grandes diferencias en la estimación de la eficiencia volumétrica (el balance volumétrico no varía significativamente entre ambos modelos), el modelo de pulsos triangulares es ligeramente mejor para estimar la eficiencia eventual. La mejoría en la estimación de la eficiencia eventual estriba en la influencia que tiene en los resultados la forma del pulso de escorrentía. En efecto, para contabilizar un vertido, el pulso triangular es más realista ya que se reproduce mejor la respuesta de la cuenca en ese sentido: la existencia de un pico de caudal aumenta el riesgo de que se contabilice un vertido. Por el

contrario, no ocurre lo mismo en la evaluación de la eficiencia volumétrica, donde los resultados son ligeramente mejores con el modelo de pulsos rectangulares. Esa mayor fidelidad del modelo de pulsos triangulares en la contabilización de vertidos, repercute negativamente en la evaluación del volumen vertido, sobrevalorándolo.

El análisis así desarrollado demuestra la bondad del modelo analítico probabilístico adoptado en los diferentes escenarios analizados ( $Q_V = 0$  y  $Q_V > 0$ ). Los buenos resultados en los ajustes alcanzados en la caracterización de la lluvia subyacen tras la aplicación de la teoría de las funciones derivadas para la obtención de las leyes probabilísticas que gobiernan el régimen de frecuencias y magnitud de los vertidos del tanque al medio receptor.

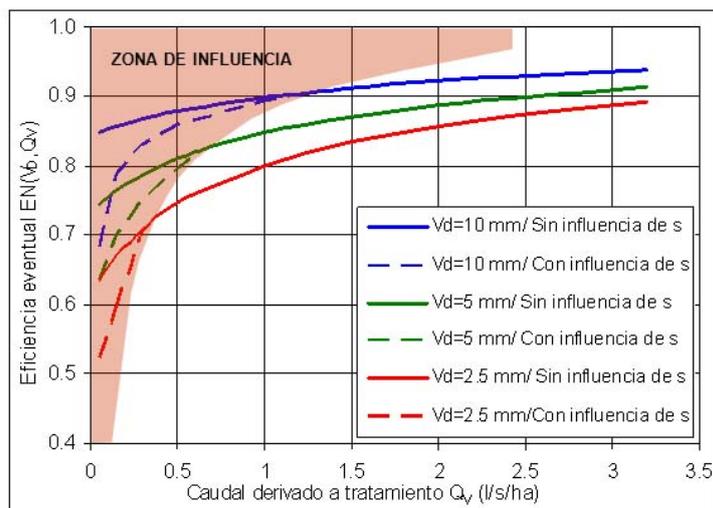


Figura 6. Influencia de la secuencia temporal ( $s$ ) en  $EN(V_D, Q_V)$

### Influencia de la secuencia temporal de eventos

Se plantea a continuación el estudio de la influencia que tiene en los resultados la consideración de la secuencia temporal de los eventos de precipitación; esto es, el papel que juega en el proceso la variable duración del tiempo seco ( $S$ ). Esta variable introduce dos nuevos argumentos en el problema: el tiempo de vaciado del depósito y el riesgo de que éste no se encuentre completamente vacío cuando acontece el evento de lluvia. Así, el efecto de la variable  $S$  sobre  $EN$  y  $EV$  radica en la posibilidad, en función de los parámetros de diseño del sistema, de no disponer del depósito completamente vacío cuando se produce un evento de lluvia. Esta posibilidad depende por tanto de la importancia relativa del tiempo de vaciado del depósito ( $V_D/Q_V$ ) respecto de la separación crítica  $s_0$  que define los eventos independientes de precipitación (para el caso analizado en Valencia, resultan en promedio 27.3 eventos independientes por año). En efecto, si  $V_D/Q_V \leq s_0$ , la variable  $S$  no introduce ningún cambio en la estimación de  $EV$  y  $EN$ . Por el contrario, si  $V_D/Q_V > s_0$ , existe el riesgo de que sobrevenga un evento de precipitación sin que el depósito esté completamente vacío.

El análisis de la casuística que se aborda se ciñe, por tanto, al rango en el que el tiempo de vaciado del depósito excede de la separación crítica de evento, existiendo entonces el mencionado riesgo de no contar con toda la capacidad de almacenamiento al comienzo de un evento de precipitación. Para el caso práctico aplicado a la pluviometría de Valencia, cabe recordar que la separación crítica obtenida del análisis de la es-

tructura externa de la lluvia es  $s_0 = 22$  horas. Por tanto, el rango de influencia de la variable  $S$  en la estimación de las eficiencias se restringe a los casos en que se cumpla  $V_D/Q_V > 22$ . En la Figura 6 se comparan los resultados analíticos para la estimación de la eficiencia eventual  $EN$  considerando o no la influencia de la variable  $S$  en el proceso. Como era previsible, en el rango  $V_D/Q_V > s_0$ , el indicador  $EN$  se ve claramente mermado como consecuencia de la modificación que sufre el balance volumétrico al considerar el proceso temporal completo (zona de influencia sombreada).

No obstante, cabe profundizar en el análisis de la restricción anterior. ¿Qué implicaciones tiene diseñar en ese rango en que  $V_D/Q_V > s_0$ ? Evidentemente, cuanto mayor sea el ratio  $V_D/Q_V$ , mayor será el tiempo de vaciado del depósito y esto no sólo implica la merma en las eficiencias del tanque, sino que supone una complicación en la gestión del propio depósito en cuanto a los procesos bioquímicos que se producirán en las aguas retenidas y las consecuencias de éstos (malos olores, entre otros). El diseño tiene que prever que el almacenamiento de agua en el tanque no puede dilatarse demasiado en el tiempo. Sin embargo, esto choca con otra consideración, ya que el vaciado no puede ser todo lo rápido que se desee, puesto que la capacidad de admisión aguas abajo en la EDAR (representada en el modelo por  $Q_V$ ) es limitada. Superarla implicaría trasladar la DSU aguas abajo, a la propia EDAR. En definitiva, se tiene que ser consciente de que la elección del par  $V_D, Q_V$  no sólo se basa en unos valores de  $EN$  y  $EV$  adecuados,

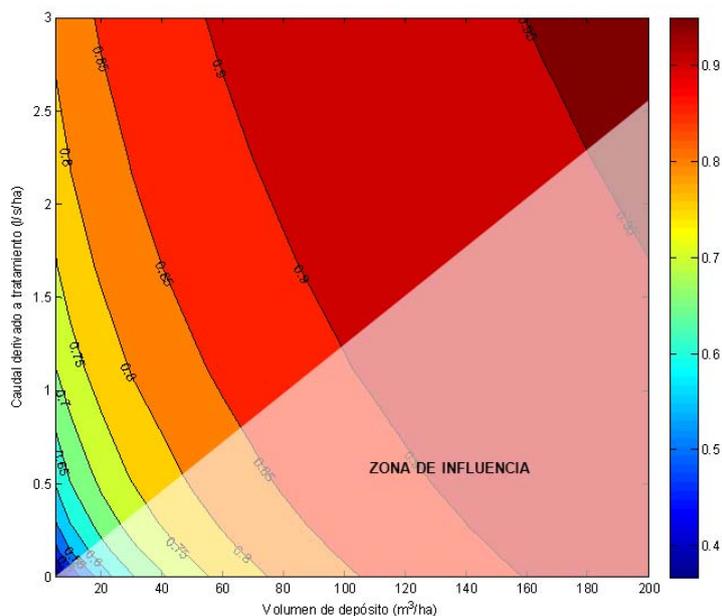


Figura 7. Abaco de eficiencia eventual en la cuenca piloto

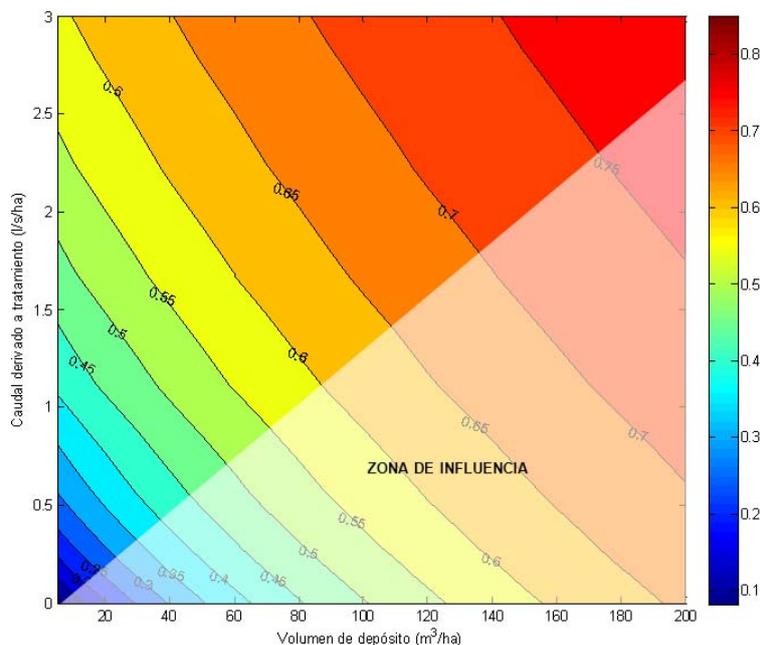


Figura 8. Abaco de eficiencia volumétrica en la cuenca piloto

sino que debe considerar los dos aspectos mencionados anteriormente. En cualquier caso, las implicaciones de la restricción  $V_D/Q_V > s_0$  parecen lo suficientemente fuertes como para tratar de evitar ese rango en el dimensionamiento volumétrico del tanque.

### Ábacos de eficiencia

De cara a su uso como ábacos de prediseño de tanques de tormenta bajo las hipótesis adoptadas en Valencia, en las Figuras 7 y 8, se sintetizan los resultados obtenidos anteriormente. Las isóneas de eficiencia que se adjuntan establecen las relaciones  $EV = EV(V_D, Q_V)$  y

$EN = EN(V_D, Q_V)$  para el caso de la cuenca piloto analizado en Valencia.

## CONCLUSIONES

La aplicación de la teoría de las distribuciones derivadas a la caracterización previa del régimen pluviométrico permite obtener las leyes que rigen la respuesta de la cuenca y del tanque de tormenta como parte del sistema de drenaje urbano. El establecimiento de las funciones de distribución de los volúmenes de escorrentía y de los volúmenes vertidos al medio receptor permite evaluar los indicadores seleccionados para la caracterización de los estándares de emisión del depósito, describiendo además probabilísticamente el régimen de vertidos en cuanto a la magnitud y la frecuencia de los mismos, a partir de una metodología universal, que debe sin embargo particularizarse para obtener resultados específicos en lugares concretos. La eficiencia volumétrica ( $EV$ ) establece la relación de la escorrentía retenida respecto de la producida mientras que la eficiencia eventual ( $EN$ ) recoge la probabilidad de que en un evento no se produzca vertido, esto es, la proporción a largo plazo de eventos completamente retenidos.

Los resultados obtenidos del desarrollo del caso  $Q_V = 0$  resultan absolutamente satisfactorios, fruto del carácter exclusivamente volumétrico del análisis planteado y de la precisión alcanzada en la caracterización del régimen de lluvias. En el caso general, con  $Q_V > 0$ , en el que entra en juego la duración de los eventos, aparecen ligeras distorsiones entre el modelo probabilístico planteado y los resultados que arroja la simulación integral. Estas diferencias son fundamentalmente fruto de la simplificación que resulta de la forma de los pulsos de escorrentía. Sin embargo, los indicadores de bondad siguen siendo satisfactorios y validan los resultados alcanzados.

Por último, se analiza la influencia en los resultados de la secuencia temporal de los pulsos de lluvia. Los indicadores  $EN$  y  $EV$  sufren una merma lógica cuando se materializa el riesgo de no contar con toda la capacidad de almacenamiento del tanque al inicio de la tormenta. No obstante, dicho riesgo se agudiza cuando el tiempo de vaciado del depósito crece por encima de valores razonables, rango de diseño que en principio debe ser evitado.

Con el análisis desarrollado se establecen por tanto los estándares de emisión volumétrico ( $EV$ ) y eventual ( $EN$ ) para un determinado par de diseño ( $V_D, Q_V$ ). El diseño alcanzado en base a estándares de emisión deberá someterse a

continuación al cumplimiento de los objetivos de calidad ambiental (EQS) donde se tendrá que analizar la relación vertido – medio receptor.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$ : Área de la cuenca  
 $a_k$ : Ratio de área relativa al uso  $k$   
 $A_k$ : Área de la cuenca con uso  $k$   
 $b, B$ : Duración de evento y su variable aleatoria  
 $B_N$ : Duración neta del evento de precipitación  
 $E(X)$ : Valor esperado de la variable  $X$   
 $E_k$ : Volumen de escorrentía producido por el uso  $k$   
 $EN$ : Eficiencia eventual derivada del modelo analítico  
 $\overline{EN}$ : Eficiencia eventual según simulación integral  
 $EV$ : Eficiencia volumétrica derivada del modelo analítico  
 $\overline{EV}$ : Eficiencia volumétrica según simulación integral  
 $F_X(x)$ : Función de distribución de la variable  $X$   
 $f_X(x)$ : Función de densidad de la variable  $X$   
 $j$ : Evento  
 $k$ : Índice de uso de suelo  
 $N$ : Número de usos  
 $p(\cdot)$ : Probabilidad  
 $P_{0k}$ : Umbral de escorrentía relativo al uso  $k$   
 $Q_V$ : Caudal derivado a depuradora  
 $s, S$ : Separación entre eventos y su variable aleatoria  
 $s_0$ : Separación crítica de evento  
 $t_C$ : Tiempo de concentración  
 $v, V$ : Volumen de evento y su variable aleatoria  
 $V_D$ : Volumen de tanque  
 $V_{DQ}^*, V_D^*, V^*$ : Lluvia generadora de volumen de tanque  
 $v_E, V_E$ : Volumen de escorrentía y su variable aleatoria  
 $V_{Ej}$ : Volumen de escorrentía producido en el evento  $j$   
 $v_V, V_V$ : Volumen vertido y su variable aleatoria  
 $V_{Vj}$ : Volumen vertido en la simulación del evento  $j$   
 $\alpha$ : Parámetro de la función Pareto de volúmenes de evento  
 $\beta$ : Parámetro de la función exponencial de separaciones de evento  
 $\delta_j$ : Variable binaria de conteo de vertido en el evento  $j$   
 $\lambda$ : Parámetro de la función exponencial de duraciones de evento  
 $\kappa$ : Parámetro de la función Pareto de volúmenes de evento.

---

**REFERENCIAS**

---

- Adams B.J. y Papa F., (2000). Urban stormwater management planning with analytical probabilistic methods. John Wiley & Sons, Inc, New York, 358 pp.
- Andrés-Doménech I. y Marco Segura J.B., (2008). Multivariate rainfall distributions for stormwater detention tank sizing using probabilistic and single-event approaches. A comparison between northern and eastern country-region Spain. Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburg, Scotland, UK. CD-ROM.
- Balistrocchi M., Grossi G. y Bacchi B., (2008). Assessment of the long term efficiency of CSO capture tanks by semiprobabilistic methods. Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburg, Scotland, UK. CD-ROM.
- Benjamin J.R. y Cornell C.A., (1970). Probability, statistics and decision for civil engineers. McGraw Hill.
- CEDEX, (2007). Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, CEDEX, CEH. ISBN 978-84-7790-438-0.
- Di Toro D.M. y Small M.J., (1979). Stormwater interception and storage. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 105 (EE1), 43–54.
- Field R. y Lager J.A., (1975). Urban runoff pollution control. State of the art. Journal of the Environmental Engineering, ASCE, 101 (NEE1), 107–125.
- González, J., (2001). Metodología para la modelación y diseño de redes de saneamiento urbano aplicada a la ciudad de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.
- Guo Y. y Adams B.J., (1998). Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models. 1. Runoff volume. Water Resources Research, American Geophysical Union, 34(12), 3421–3431.
- Lau J., Butler D. y Schütze M., (2002). Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact?. Urban Water, Elsevier, 4, 181–189.