Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia

(Recibido: 02/05/2016; Aceptado: 13/06/2016)

Espín, P[1]; García, J. T[1]; Castillo, L. G[1]; Nevado, S. M[2]; Martínez, P. D[2]
[1]Grupo de investigación Hidr@m. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203 Cartagena (España)
[2]Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia (EMUASA), Plaza Circular, Nº 9, 30008, Murcia (España)
Teléfono: 968327026
Email: pel1@alu.upct.es

Resumen. *El lavado de las superficies de cuencas urbanas y de la red de abastecimiento supone un incremento de la carga contaminante en el agua residual. Los vertidos de estas aguas de lavado procedentes de las descargas de sistemas de saneamiento unitarios (DSUs) pueden provocar el flujo de importantes volúmenes de contaminación a los cuerpos de agua receptores. El fenómeno de primer lavado ha sido estudiado en un punto de la red de saneamiento de la ciudad de Murcia. Mediante datos de precipitación, turbidez y un modelo matemático se han calculado los hidrogramas, polutogramas y curvas de distribución de la masa contaminante vs volumen o curvas M (V), demostrando la presencia de este fenómeno en la cuenca estudiada.*

Palabras clave. *Curvas M (V); polutogramas; primer lavado; sistemas de saneamiento unitarios.*
Abstract. *Flushing on urban catchment areas and sewer system involves an increase in the pollution load in waste water. In these situations, Combined Sewer Overflows (CSOs) can transport important volumes of pollution to receiving water bodies. First flush phenomenon has been studied at a location of the Murcia's sewer system. Information of precipitation, turbidity and flow are available. From this data, hydrographs, pollutographs and mass/volume curves have been obtained, proving the presence of this phenomenon in the studied basin.*
Keywords. *M (V) curves; pollutographs; first flush; combined sewer systems.*

1. Introducción

Los sistemas de saneamiento y drenaje urbano han evolucionado a lo largo de la historia junto con las necesidades de mejorar las condiciones higiénicas, el bienestar de la sociedad, la disponibilidad de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente.

Durante estos últimos 20 años, las tecnologías y las demandas sociales se han intensificado notablemente, lo que unido a un refuerzo de los objetivos relacionados con la calidad de los sistemas acuáticos, han provocado el rechazo de prácticas que con anterioridad eran aceptadas. Es por ello que se ha tomado conciencia a lo largo de todo el mundo de que las cargas contaminantes se movilizan en los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia y los notables impactos que estos flujos generan sobre el medio receptor (López, 2005).

Los depósitos de sólidos y sustancias a lo largo de las cuencas urbanas durante periodos secos pueden conllevar importantes problemas medioambientales. Durante los episodios lluviosos, las primeras aguas de escorrentía superficial provocan el lavado de las superficies impermeables de las cuencas urbanas (fenómeno de primer lavado o *first flush*), de modo que los alivios de los sistemas unitarios de alcantarillado (DSUs) pueden provocar el flujo de significativas cantidades de contaminación al medio (Roca, 2015).

Estos problemas ya han sido tenidos en cuenta en la legislación vigente, siguiendo el artículo 259 del Real Decreto 1290/2012 de 7 de septiembre, que modifica el anterior Reglamento del Dominio Público Hidráulico: *"Con el fin de reducir convenientemente la contaminación generada en episodios de lluvia, los titulares de vertidos de aguas residuales urbanas tendrán la obligación de poner en servicio las obras e instalaciones que permitan retener y evacuar adecuadamente hacia la estación depuradora de aguas residuales urbanas las primeras aguas de escorrentía de la red de saneamiento con elevadas concentraciones de contaminantes producidas en dichos episodios".*

Dentro de este contexto, el conocimiento del comportamiento de la red y la acumulación de contaminación es un aspecto fundamental en el control de los vertidos. El estudio de las relaciones entre los parámetros hidrológicos e hidráulicos en cada episodio lluvioso y las movilizaciones de contaminantes puede ser una herramienta importante

para predecir el comportamiento de la red a través de variables sencillas y fácilmente adquiribles (como por ejemplo la precipitación y la turbidez), en combinación con un modelo hidráulico y de calidad del sistema.

Gracias a datos tomados en tiempo real durante los episodios lluviosos junto con las correlaciones entre parámetros, se pueden elaborar polutogramas y curvas de acumulación de contaminación que permitan conocer y estimar el efecto de lavado con el objetivo de desarrollar estrategias operativas para disminuir este problema.

Este trabajo tiene como objetivo presentar algunos de los principales resultados obtenidos en el análisis de un punto de descarga de la red de saneamiento unitaria de la ciudad de Murcia. Para este análisis se han empleado datos en tiempo real de turbidez junto con simulaciones del comportamiento de la red mediante un modelo matemático con el software SWMM (*Storm Water Management Model*).

2. Material y métodos

2.1. Descripción de la zona de estudio

El conjunto de datos empleados en este estudio pertenecen a un punto de la red de saneamiento de la ciudad de Murcia por el que circula el agua drenada de una cuenca de 43.34 km^2 con una densidad de población aproximada de 500 hab/km^2. En el punto de medida de la turbidez el colector tiene un diámetro de 1800 mm, siendo su pendiente media del 2 ‰.

2.2. Datos disponibles

En este trabajo se han empleado datos de precipitación, turbidez y caudal en el colector de estudio. A continuación se detallan diversos aspectos de dicha información, resumida en la tabla 1.

- Precipitación: se han analizado un total de 8 episodios lluviosos repartidos entre los años 2014, 2015 y 2016.
- Turbidez: este parámetro mide la reducción de la transparencia del agua por la presencia de materia sin disolver. Se han estudiado los datos de turbidez registrados desde 2014 en el punto de análisis con el objetivo de determinar el patrón en tiempo seco y su alteración por el fenómeno de primer lavado durante un episodio lluvioso. La figura 1 muestra el efecto *first flush*.
- Caudal: para la obtención de los caudales se ha empleado un modelo de la red de saneamiento sobre el software SWMM. Dicho modelo cuenta con 200 km de red, unos 4639 nodos y más de 3700 subcuencas. A través de esta herramienta es posible obtener los caudales en el punto de análisis mediante los datos de precipitación. En cuanto al tiempo seco, el caudal medio en el punto de análisis es de 370 L/s con un factor punta de 1.43.

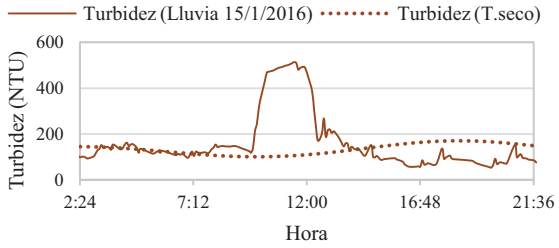

Fig. 1. Comparación entre turbidez para periodo seco y lluvioso.

Tabla 1. Características de los eventos de lluvia.

Fecha	Perido seco (días)	P. total (mm)	Duración (h)	I. med (mm/h)	I. máx (mm/h)	Turbidez máx (NTU)	Q máx (m^3/s)
24/6/14	7	17.9	6.3	2.84	6	987.48	2.1
16/9/14	82	2.8	1.5	1.91	6.8	650.15	0.77
14/12/14	9	20.5	8.7	2.36	6.6	724.34	2.5
11/6/15	22	11.61	7.4	1.57	7.32	828.14	1.97
15/1/16	35	13.88	6.7	2.07	6.84	510.38	2.3
30/1/16	15	4.28	2.7	1.58	5.88	671.55	1.58
21/3/16	15	44.62	28	1.59	12.24	559.52	2.26
4/4/16	13	19.78	11.2	1.77	14.4	460.32	2.66

2.3. Relación entre turbidez y sólidos en suspensión totales

El control basado únicamente en el análisis de muestras puntuales es técnica y económicamente inviable si se requiere un estudio de la red extenso en espacio y tiempo. Por lo tanto, es necesario recurrir a herramientas de determinación indirecta en tiempo real de los parámetros contaminantes. Dentro de este aspecto cobra importancia la turbidez.

Son numerosos los trabajos (Bertrand-Krajewski, 2004; Del Río, 2011; Hannouche, 2011) que ponen de manifiesto la posibilidad de emplear mediciones en continuo de este parámetro para monitorizar la evolución de los flujos de contaminantes a través de funciones de correlación directas. Por tanto, valores en continuo de turbidez pueden ser empleados para diversos propósitos, como la estimación de las cargas de contaminantes por requisitos legislativos, la operación, planificación y rehabilitación de los sistemas de alcantarillado o la modelización en tiempo real del sistema.

No obstante, es necesario tener en cuenta que el empleo de la turbidez para estos fines requiere de una correcta calibración de la instrumentación, así como de un mantenimiento adecuado de los equipos. Además, es necesario un tratamiento estadístico de datos de series temporales continuas para establecer las funciones de correlación adecuadas para cada sistema, pues estas pueden ser diferentes para cada lugar de estudio.

Dada la importancia de este aspecto, son numerosos los estudios que han tratado de establecer las funciones de correlación entre parámetros medidos en continuo en la red con otros parámetros como pueden ser los sólidos en suspensión o los consumidores de oxígeno.

En el presente trabajo se han empleado las formulaciones extraídas del estudio de Del Río (2011) realizado en una cuenca urbana con alcantarillado unitario de la ciudad de Santiago de Compostela (ecuación 1). En dicho estudio se presentan diversas expresiones que relacionan los parámetros de contaminación tanto en tiempo seco como en los episodios de lluvia. La figura 2 muestra los coeficientes de correlación obtenidos en dicho trabajo entre los principales indicadores de contaminación.

	DQO	DQO_sol	DBO_5	SS	SSV	SD	ST	Turbidez	Cond._20º
DQO	1.00	0.87	0.97	0.95	0.95	0.73	0.97	0.88	0.47
DQO_sol	0.87	1.00	0.85	0.84	0.84	0.72	0.87	0.82	0.64
DBO_5	0.97	0.85	1.00	0.96	0.96	0.74	0.98	0.91	0.48
SS	0.95	0.84	0.96	1.00	1.00	0.64	0.99	0.95	0.39
SSV	0.95	0.84	0.96	1.00	1.00	0.63	0.98	0.95	0.40
SD	0.73	0.72	0.74	0.64	0.63	1.00	0.74	0.59	0.70
ST	0.97	0.87	0.98	0.99	0.98	0.74	1.00	0.94	0.49
Turbidez	0.88	0.82	0.91	0.95	0.95	0.59	0.94	1.00	0.39
Cond._20º	0.47	0.64	0.48	0.39	0.40	0.70	0.49	0.39	1.00
pH	-0.49	-0.26	-0.49	-0.45	-0.43	-0.28	-0.44	-0.42	0.13
CF	0.60	0.56	0.61	0.58	0.58	0.63	0.64	0.56	0.43

Fig. 2. Matriz de correlación de parámetros básicos en tiempo de lluvia (Del Río, 2011).

Dado el objetivo del presente estudio, se han seleccionado los sólidos en suspensión como el parámetro representativo del fenómeno de lavado, ya que presentan una correlación elevada (95%) con la turbidez según los datos de Santiago de Compostela. La ecuación empleada es la siguiente:

$$SS = 2.4569 \cdot T - 18.197 \qquad (1)$$

Siendo SS la concentración de sólidos en suspensión en mg/L y T la turbidez en NTU.

3. Análisis de resultados

Las variaciones de las tasas de flujo contaminante pueden ser descritas por medio de tres curvas:

- Hidrograma Q(t), calculado tanto para el episodio lluvioso como para el tiempo seco en la misma hora del día con el objetivo de identificar el instante de comienzo del análisis.
- Polutograma C(t), curva que describe la concentración del contaminante considerado (sólidos en suspensión en este caso) para cada intervalo de tiempo del suceso.
- Hietograma P(t), que representa la distribución de la precipitación durante el evento.

Por otra parte, estas curvas pueden verse alteradas en función de otros parámetros como el periodo seco antecedente al suceso lluvioso, las características de la cuenca o la condición del sistema de saneamiento (Bertrand-Krajewski *et al*., 1998).

La figura 3 muestra el conjunto de curvas para el episodio del 11 de junio del 2015. En la ordenada izquierda se presentan las concentraciones de sólidos en suspensión en mg/l junto con el caudal en l/s mientras que en la derecha se muestra la precipitación.

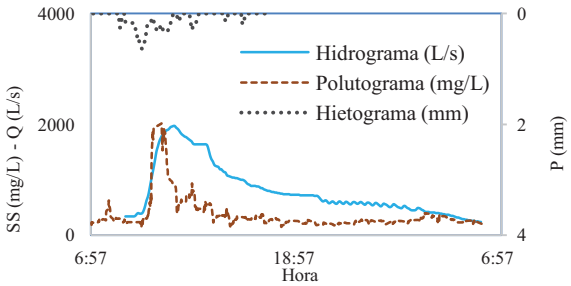

Fig. 3. Curvas para el episodio del 11/6/2015.

Con el objetivo de realizar un estudio comparativo de la movilización de masas y el efecto de primer lavado para diferentes eventos es necesaria una representación adimensional de los sucesos. Para ello se grafican en unos ejes cartesianos la relación entre la masa acumulada dividida entre la masa total y el volumen acumulado dividido entre el volumen total. Estas gráficas son conocidas como curvas de distribución de la masa contaminante vs volumen o curvas M (V) y están representadas en la figura 4 para las lluvias analizadas.

Si la concentración durante el suceso se mantiene constante, la curva viene definida por una recta con pendiente de 45º. Por otra parte, si la curva se inscribe en la parte superior se puede afirmar que existe fenómeno de primer lavado, de modo que a mayor distancia respecto a la bisectriz, más agudo será el efecto (Di Modugno *et al*., 2015; Barco *et al*., 2008).

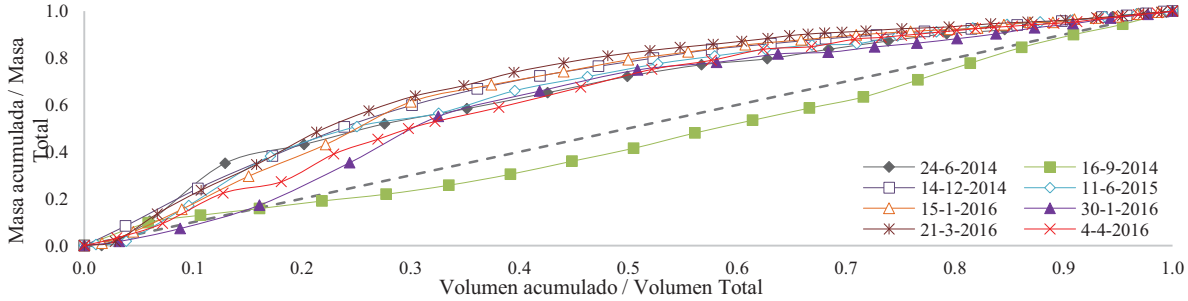

Fig. 4. Distribución de las curvas M (V) relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados.

Tal y como se muestra en la figura 4, la mayor parte de los sucesos muestran un marcado efecto *first flush*. La única curva representada en la zona inferior de la bisectriz es la del episodio del 16 de septiembre de 2014. Analizando esta lluvia con los datos mostrados en la tabla 1 es razonable admitir que la ausencia de primer lavado está motivada por la escasa precipitación total de este episodio.

4. Conclusiones

La caracterización de la calidad del agua transportada por los sistemas de saneamiento unitarios en tiempo de lluvia es un ejercicio complejo que ha adquirido una mayor importancia debido al aumento de las superficies impermeables y a los crecientes intereses medioambientales. Es por ello que lo gestores de los sistemas de saneamiento urbanos están en la obligación de mejorar el conocimiento de la calidad de los vertidos al medio receptor en los episodios lluviosos.

En este artículo se analiza el efecto de primer lavado de un total de 8 eventos lluviosos mediante el cálculo de los polutogramas y las curvas de distribución de masas. Para ello se emplea la relación entre turbidez (medida en continuo en el punto de estudio) y los sólidos en suspensión. El empleo de este tipo de correlaciones puede convertirse en una herramienta fundamental para los gestores de los servicios de aguas ya que dichas funciones posibilitan la obtención directa de los parámetros relacionados con la contaminación, permitiendo hacer más fácil el control del sistema. Si estos estudios se extienden a los puntos de vertido de la red, sería posible conocer en cada momento la carga contaminante de las aguas vertidas al medio receptor, aspecto fundamental dadas las nuevas presiones legislativas.

Según el análisis de las curvas M (V), 7 de los 8 episodios muestran un significativo efecto *first flush* de acuerdo a las definiciones de este fenómeno proporcionadas por la comunidad científica. En base a estos resultados, es posible proceder al estudio en profundidad de dispositivos de retención de los primeros caudales pluviales (tanques Anti-DSU), así como establecer estrategias de operación ante eventos lluviosos.

Para este trabajo se han empleado las ecuaciones de relación de parámetros ajustadas para una cuenca de Santiago de Compostela. Un aspecto importante a desarrollar en futuros trabajos es la calibración y validación de estas expresiones para la cuenca de estudio de la ciudad de Murcia, pues la aplicación de las funciones de correlación debe de ser ajustada para cada zona de estudio.

Agradecimientos

A la empresa Aguas de Murcia por aportar todos los datos del sistema de saneamiento necesarios para llevar a cabo este estudio.

Referencias

[1] Barco, J., Papiri, S., Stenstrom, M. K. (2008). “First flush in a combined sewer system”. Chemosphere, vol 71, no 5, pp. 827-833.

[2] Bertrand-Krajewski, J. L. (2004). “TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables”. Automation in Water Quality Monitoring II, vol 50, no 11, pp. 81-88.

[3] Bertrand-Krajewski, J. L., Chebbo, G., Saget, A. (1998). “Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon”. Water Research, vol 32, no 8, pp. 2341-2356.

[4] BOE Real Decreto 1290/2012. (2012). “Por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas”.

[5] Del Río, H. (2011). *Estudio de los flujos de contaminación movilizados en tiempo de lluvia y estrategias de gestión en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de una cuenca urbana densa de la España Húmeda*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.

[6] Di Modugno, M., Gioia, A., Gorgoglione, A., Iacobellis, V., la Forgia, G., Piccinni, A. F., Ranieri, E. (2015). “Build-Up/Wash-Off Monitoring and Assessment for Sustainable Management of First Flush in an Urban Area”. Sustainability, vol 7, no 5, pp. 5050-5070.

[7] Hannouche, A., Ghassan, C., Ruban, G., Tassin, B., Lemaire, B., Joannis, C. (2011). “Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system”. Water Science and Technology, vol 64, no 12, pp. 2445-52.

[8] López, J. S., Villar, J. C. (2005). “Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impactos sobre los ríos”. Ingeniería y territorio, vol 71, pp. 44-55.

[9] Roca, J. (2015). *Fundamentos y modelado de la contaminación movilizada por las redes de saneamiento unitarias en tiempo de lluvia con SWMM. Propuesta de un volumen de retención anti-descarga de un sistema unitario*. Trabajo fin de máster. Universidad Politécnica de Cartagena.