

**PROGRAMA PROMEDSU DE MEDIDAS DE VERTIDOS DESDE  
REDES DE ALCANTARILLADO UNITARIAS.  
EL CASO DEL  
RIO LLOBREGAT EN EL ENTORNO DE BARCELONA**

*Manuel Gómez<sup>1</sup>, Jerónimo Puertas<sup>2</sup>, Joaquín Suárez<sup>2</sup>  
1 Dep. Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - UPC  
Jordi Girona 1-3. D.-1. 08034 BARCELONA. ESPAÑA  
2 E.T.S. Enxeñeiros de Caminos, Canales y Puertos - UC  
Campus de Elviña. 15192. A CORUÑA. ESPAÑA*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El desarrollo urbano de los últimos 30 años ha producido que en numerosos países el grado de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales sea tal que un elevado porcentaje (superior en muchos casos al 90 ó 95 %) de la población se encuentra conectado a planta de tratamiento. En este caso se tiene a veces la impresión que una vez hecho esto, la calidad del agua de los ríos mejora de manera inmediata y que ya hemos realizado lo que teníamos que hacer para arreglar los problemas de polución del río, del que casi podemos olvidarnos salvo accidentes, etc. Pero hemos de recordar que la mayoría de ciudades presentan un sistema de drenaje unitario, o que aún en el caso de tenerlo separativo, la escorrentía pluvial que se vierte en tiempo de lluvia presenta una cierta carga contaminante que según los caudales del río y de vertido. Pueden suponer un agente contaminante no despreciable.

Actualmente los impactos producidos en cuencas urbanas por los vertidos del sistema de drenaje durante las precipitaciones son reconocidos como la mayor causa de la insatisfactoria calidad de los ríos. Las causas y el grado que alcanzan estos impactos es un fenómeno complejo que comenzaron a estudiar en los años 60 países como Inglaterra, Estados Unidos, Francia y Dinamarca, donde el plan de saneamiento estaba más desarrollado.

En la contaminación por escorrentía superficial se presentan dos problemáticas: por un lado el efecto hidráulico que en caso extremo ocasiona las inundaciones, y por el otro el aspecto cualitativo, los aspectos ambientales derivados y la contaminación transportada por la escorrentía. El primer tema ha sido ampliamente tratado y estudiado, dimensionando adecuadamente los sistemas de drenaje para poder evacuar con cierto nivel de seguridad las aguas pluviales, mientras que la parte cualitativa ha debido esperar a una mayor concienciación de la importancia de una mejora ambiental para una buena calidad de vida.

Las aguas recogidas por el sistema separativo dirigen las aguas residuales a las depuradoras para su tratamiento antes de ser vertidas a las aguas receptoras, mientras que las aguas pluviales se vierten directamente constituyendo los denominados en terminología anglosajona Storm Water

Overflows (SWO). En el caso del alcantarillado unitario, el efluente generado, en principio es desviado por un interceptor hasta la depuradora; pero cuando el caudal que se evacúa es superior a la capacidad del interceptor las aguas van directamente al medio receptor sin depuración alguna, para evitar inundaciones a través de los llamados Combined Sewer Overflow (CSO).

Con el vertido de los CSO sin depurar se provoca una contaminación en el medio receptor, pero no solamente por las aguas residuales vertidas, sino que hay que añadir las aguas pluviales que están también contaminadas.

Durante los periodos de tiempo seco, la cuenca urbana actúa como un depósito donde se acumulan residuos con diferente carga contaminante, los cuales son arrastrados por la escorrentía superficial generada por una precipitación. Además el agua de lluvia, al precipitarse, atrapa las partículas contaminantes de la atmósfera que en los entornos urbanos presenta altos niveles de contaminación. Los contaminantes acumulados en la cuenca y las partículas atrapadas de la atmósfera hacen que las aguas de lluvia sean aguas contaminadas. Los constituyentes más habituales son la materia orgánica, los metales pesados y los nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Por las razones expuestas en los CSO's generados por precipitaciones no necesariamente extraordinarias, las aguas receptoras se ven modificadas por la introducción de unos grandes volúmenes de agua con unas elevadas concentraciones de contaminantes muy difíciles de controlar y combatir, que pueden condicionar la existencia acuática en dichas aguas, entre otros efectos.

## **EL PROGRAMA PROMEDSU**

A finales de los años 90 se empezó a plantear dentro de la AEAS, Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento, la necesidad de plantear un programa de medidas en cuencas urbanas de los vertidos en tiempo de lluvia. Dentro de esa agrupación, se había creado un grupo de Gestión Avanzada del Drenaje Urbano GADU, que en sucesivas reuniones fue planteando esta necesidad. Planteada una propuesta al actual Ministerio de Medio Ambiente, se gestó el Programa de realización de Medidas de Descargas desde Sistema Unitarios, origen del acrónimo PROMEDSU.

El proyecto PROMEDSU se basa en la medida de los parámetros hidráulicos y de contaminación necesarios para caracterizar los vertidos desde el alcantarillado unitario en las cuencas urbanas de España. En esta primera fase se ha comenzado con cinco cuencas y unos objetivos de análisis limitados: en el futuro cabe esperar que el proyecto se amplíe a otras zonas geográficas y a otras vertientes de estudio, como por ejemplo el diseño de las estructuras de control y tratamiento de los vertidos.

El proyecto PROMEDSU cuenta con la empresa Infraestructura y Ecología como asistencia técnica, con la Universidade Da Coruña como asesoría técnica y con la colaboración de las entidades gestoras de los distintos saneamientos implicados como entes colaboradores, además de la supervisión del grupo GADU de la AEAS. En la fecha actual (junio de 2001) la labor de toma de datos

está muy avanzada y se cuenta ya con un banco de datos muy sustancial. Queda para finalizar el proyecto el análisis del banco de datos y la presentación de resultados.

### Las cuencas objeto de estudio

El proyecto se enmarca en esta primera fase en cinco ciudades y, dentro de ellas, en cinco cuencas con características conocidas. Sólo una de ellas (Arroyo del Fresno- Madrid) puede considerarse una cuenca heterogénea, ya que es de una gran extensión y usos variados. El resto son cuencas pequeñas, de características uniformes y representativas de una tipología, de unos usos urbanos y de una zona climática, por lo que cabe suponer que sus resultados puedan ser extrapolados a cuencas del mismo ámbito geográfico. No se han incluido en el estudio ciudades de clima atlántico, diferente al de estas otras ciudades incluidas en esta primera fase del estudio. A continuación se citan las cuencas estudiadas.

<b>Ciudad</b>	<b>Barcelona</b>	<b>Madrid</b>	<b>Sevilla</b>	<b>Vitoria</b>	<b>Valencia</b>
<b>Cuenca</b>	Bac de Roda	Arroyo del Fresno	Los Remedios	Almendra	Malvarrosa
<b>Area (Ha)</b>	170	3800	135	132	89
<b>Densidad Población</b>	235	60	380	140	200
<b>Clima</b>	Mediterráneo	Continental	Semi-árido	Continental	Mediterráneo

#### Barcelona: Bac de Roda

Es una cuenca urbana, de 170 Ha drenadas, con alcantarillado unitario y entrega al mar Mediterráneo con una sección de dos cajones de 5 metros de anchura y 2 de altura. Su pendiente media es del orden de 0.1%, y su grado de impermeabilidad de 80%. Se trata de una zona en expansión urbanística, con lo que en un futuro los parámetros de la cuenca pueden variar levemente. Su clima es mediterráneo, con intensidades de precipitación muy altas, superiores a los 100 – 200 mm/h durante 10 ó 15 minutos incluso para periodos de retorno de 5 años.

#### Madrid: Arroyo del Fresno

Es una cuenca mixta, de uso urbano y rural, de 3800 Ha y pendiente media del 2%, con red de saneamiento unitaria y entrega al río Manzanares. Su grado de impermeabilidad es del 37%. Al tratarse de una cuenca de grandes dimensiones, los parámetros que se obtengan se entenderán representativos del conjunto de la cuenca, y no podrán imputarse a un uso concreto. El río Manzanares padece de graves problemas de calidad durante episodios de lluvia.

### **Sevilla: Los Remedios**

Es una cuenca urbana, de 135 Ha y edificación muy densa, con bloques de más de 4 alturas. Incluye los barrios de Triana y Los Remedios, con una pendiente media del 0.5%. Entrega a la estación de bombeo de Los Remedios, junto al río Guadalquivir. Se trata de una cuenca muy homogénea, representativa de un tipo de urbanización y de una zona climática caracterizada por una pluviometría muy escasa. Dado que los problemas de inundación no son frecuentes, el municipio está muy interesado en resolver los problemas de calidad de agua.

### **Valencia: Malvarrosa**

Es una cuenca urbana y de muy baja pendiente, con 89.7 Ha totales, de las que 74 Ha están drenadas por la red, correspondiendo el resto a playas. El medio receptor es el Mar Mediterráneo, y cuenta con una estación de bombeo para impulsar las aguas residuales; los excesos de agua son vertidos al mar. El grado de impermeabilización es importante, pero las edificaciones no son muy altas. El clima es mediterráneo con frecuentes tormentas de otoño de elevadas intensidades de lluvia, similares a las de Barcelona.

### **Vitoria: Almendra**

La cuenca, de 132 Ha, cubre el casco antiguo (Almendra) y parte del Ensanche de la ciudad. Las pendientes en la Almendra son muy altas (3% ó más) y se hacen algo más bajas en la zona del Ensanche. El medio receptor es el río Zadorra, cuyo mantenimiento de su calidad de agua es un objetivo prioritario de la ciudad. Es una zona muy densamente urbanizada, completamente impermeable y con un clima representativo de la zona norte peninsular.

De los datos que se están obteniendo de estas cuencas se realiza un análisis cuyas bases y metodología se describen en los apartados siguientes.

Actualmente, se admite que el control de los vertidos desde las redes unitarias debe realizarse bajo el principio de la "Gestión Integrada", considerando todas las relaciones que se establecen entre: A) lluvia, B) superficie de cuenca C) sistema de colectores; D) estación depuradora; E) medio receptor. Como paso previo a su control se plantea un conocimiento del medio, basado en los siguientes apartados:

1. Objetivos de calidad del agua en el medio receptor.
2. Medida y análisis de las lluvias
3. Modelos de transformación de lluvia-escorrentía
4. Caracterización (caudales, concentraciones, distribución granulométrica de los sólidos) y modelado de los reboses
5. Comportamiento de la estación depuradora frente a variaciones de caudal y carga
6. Capacidad autodepuradora del medio receptor

## **Metodología de trabajo**

En el presente apartado se presentarán los diferentes métodos de tratamiento de la información obtenida de la caracterización de las aguas de los vertidos y de las aguas de escorrentía urbana en las cinco ciudades piloto del presente proyecto. La organización de la información obtenida, la parametrización de los sucesos muestreados, el tratamiento y análisis posterior de la información va a permitir obtener conclusiones a dos escalas diferentes:

- a) A nivel local, de subcuenca o ciudad.
- b) A nivel regional o nacional, mediante estudio comparativo de los datos obtenidos en las diferentes ciudades.

Los sucesos capturados permitirán conocer parámetros específicos que nos permitirán trabajar en cuatro escalas temporales:

- a) Concentración y flujos máxicos instantáneos (conociendo el hidrograma y el polutograma).
- b) Conocimiento de la carga total de un suceso y su volumen. Se puede obtener también la concentración media de suceso.
- c) Las cargas que se acumulan a lo largo de un periodo entre lluvias.
- d) Las cargas que se pueden acumular y son arrastradas por la escorrentía urbana hacia los medios receptores en un determinado periodo de tiempo.

El tratamiento de la información y la metodología que se propone a continuación permitirá establecer conclusiones en los ámbitos espacial y temporal citados, y darán a conocer con precisión y fiabilidad el comportamiento de la contaminación asociada a la escorrentía urbana y los vertidos desde la red siendo por tanto el objetivo final del presente proyecto.

### **Objetivos de la caracterización de las aguas de RAU y escorrentía urbana.**

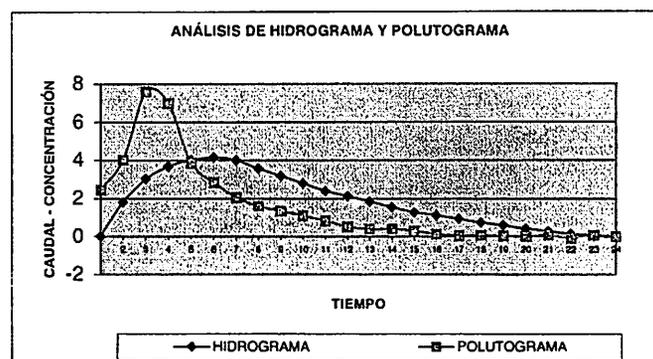
Los objetivos que se fijaron al comienzo del proyecto fueron los siguientes:

- Conocimiento de los niveles de contaminación de tiempo seco en las redes unitarias analizadas; caracterización de la variación horaria de concentraciones y caudal(contaminación de base).
- Caracterización de vertidos de NIVEL II para fósforo y metales pesados.
- Caracterización de vertidos de NIVEL III para DBO<sub>5</sub>, DQO, TOC, sólidos, NTK, nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), turbidez, hidrocarburos y contaminación bacteriológica en vertidos en zonas de baño.

"Nivel II" significa el estudiar las cargas asociadas a sucesos de tormenta de una forma promediada, es decir, sólo se obtienen valores de carga total de cada suceso en los contaminantes de interés. Se desconoce, por lo tanto, la variación en el tiempo de las concentraciones o las cargas de los contaminantes durante el suceso.

"Nivel III" significa que se estudia la variación de la carga (concentraciones y caudales, por lo tanto) durante un suceso de lluvia. Este nivel de aproximación describe la carga de un suceso de tormenta en función del tiempo. Este nivel de aproximación permite estudiar el efecto de las diferentes fuentes de contaminación y de, por ejemplo, las variaciones en la intensidad de la lluvia y puede indicar la existencia o no de "primer lavado" de contaminantes.

- Los parámetros hidrológicos del suceso de lluvia, incluyendo el número de días sin lluvia, datos de lluvia cada 5 minutos, y nivel y caudal en el punto de vertido
- Parámetros de caracterización de la calidad de aguas, que se pueden agrupar por familias:
  - COD, BOD<sub>5</sub>, TOC
  - Turbidez, Sólidos Totales (ST), Sólidos en Suspensión (SS), Sólidos Disueltos (SD) y sus fracciones volátiles (SSV, SDV)
  - Nitrógeno Kjeldalh (NTK), Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Fósforo total (P)
  - Metales (Cu, Pb, Zn, Cd)
  - Hidrocarburos totales (HC)
  - Conductividad, pH, temperatura



*Ejemplo de suceso con definición de Nivel III*

### Tratamiento y análisis de los caudales y concentraciones de tiempo seco.

La escorrentía de un suceso de lluvia, cuando entra en una red unitaria, va a significar una superposición de su caudal y de su masa contaminante sobre los caudales y cargas que fluyen por la red durante tiempo seco. Como en el estudio que se está realizando la medición de los sucesos se realiza en secciones de control en la red unitaria se miden de forma integrada, mezclada, todas las aguas y masas de contaminantes.

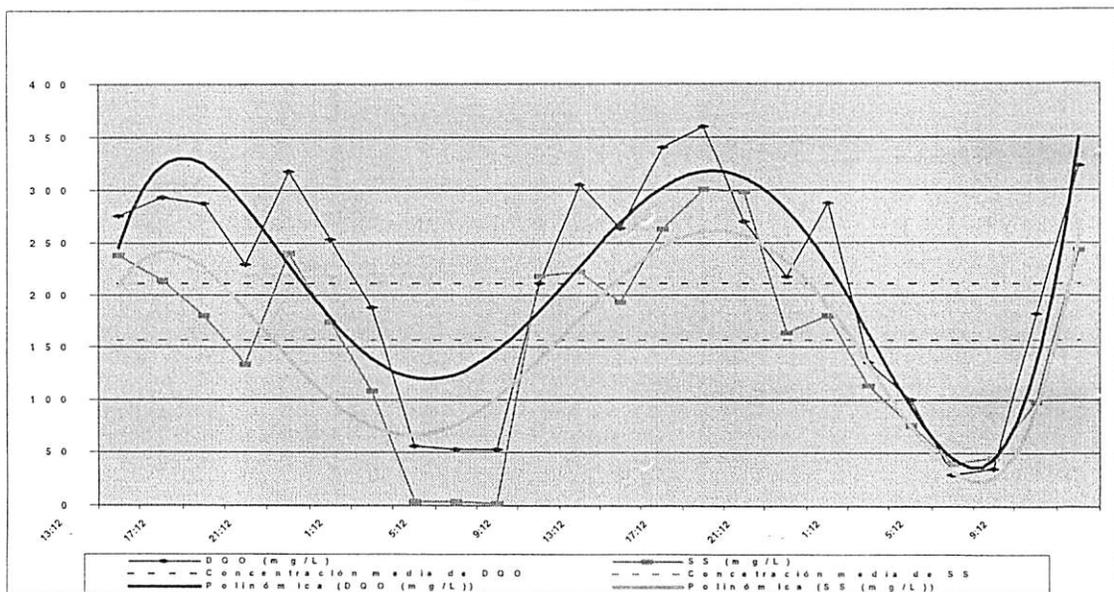
En ocasiones las concentraciones de contaminantes aportados por la escorrentía superficial son tal elevadas (por ejemplo en SS valores de 3000-4000 mg/l) que los niveles de tiempos seco no son significativos en

determinados tipos de estudios y no es necesario proceder a intentar separar aguas residuales y agua de escorrentía, siendo válido un balance global de masas de contaminantes.

Sin embargo, si se ha realizado una buena caracterización de tiempo seco se puede llegar a definir bien una concentración media diaria "de diseño" o bien una curva de variación horaria media "de diseño". Sucesos cortos a diferentes horas del día, por ejemplo en la noche-madrugada o mediodía, se superpondrán a concentraciones y caudales muy diferentes.

En las secciones de control en las que sea posible definir bien un valor medio bien una curva media se restarán los valores de las concentraciones y caudales del suceso medido con el fin de poder calcular con mayor precisión la masa movilizada por el suceso. Esta masa puede proceder tanto de la superficie de la cuenca como de la resuspensión de sedimentos de diferentes elementos de la red de alcantarillado (imbornales, conductos, pozos, etc.)

Todos los valores que se obtengan de la caracterización de tiempo seco se comparan entre las diferentes ciudades y se detectarán posibles concentraciones anómalas de algún compuesto.



*Ejemplo de curva de contaminación diaria (DQO y Sólidos en suspensión)*

## Tratamiento y análisis de la información

El procedimiento de organización y tratamiento de la información que se sigue en este proyecto es el siguiente:

En cada uno de los sucesos se estructurará toda la información disponible en una ficha tipo, ó "ficha de suceso", en la cual se establecen los siguientes bloques de información.

- 1) Datos básicos de identificación del suceso.

- 2) "Checklist" breve de contenido e información disponible del suceso.
- 3) Curvas básicas de variación de concentraciones durante el suceso (hidrogramas-polutogramas).
- 4) Parámetros descriptores del suceso (hidrológicos, contaminación, coeficientes de primer lavado).

## Modelización

Los métodos descriptivos de estimación de cargas de aguas de escorrentía, ó de sucesos de contaminación tratan de forma determinista los mecanismos hidrológicos (lluvia/escorrentía/transporte en red de colectores) y de contaminación (acumulación/lavado/reacciones). Estos mecanismos pueden representarse normalmente por expresiones matemáticas que se incorporan dentro de programas de simulación de la cantidad y contaminación/calidad del agua.

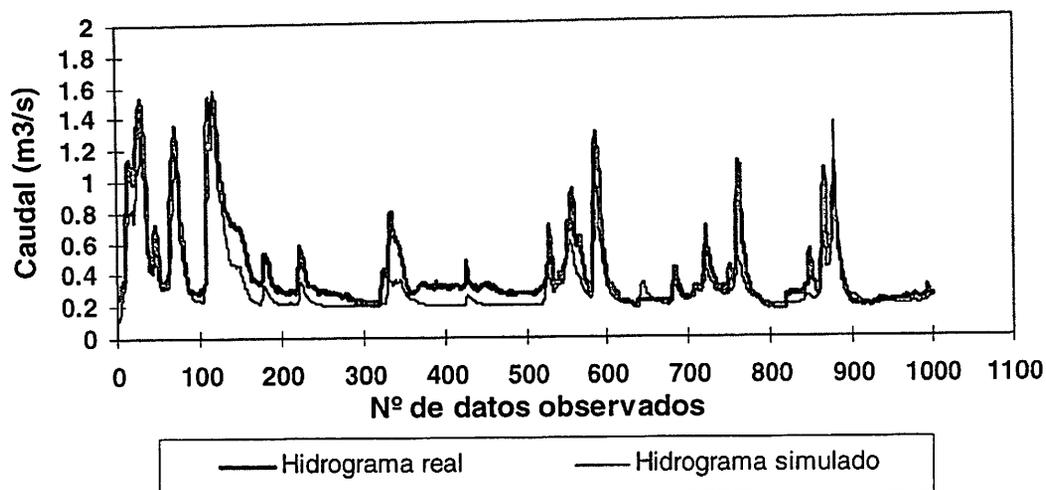
El programa de simulación que se utilizará en este proyecto es el "Storm Water Management Model" (SWMM).

Las razones que hacen del SWMM una buena herramienta son las siguientes:

- Los bloques del SWMM se adaptan a todas las partes de que consta el presente estudio (bloque de escorrentía, transporte y almacenamiento – sistemas de control y tratamiento de reboses-).
- Se trata de un programa que se usa con frecuencia en todo el mundo. En la literatura especializada aparece profusamente mencionado. La consecuencia de lo anterior es la gran cantidad de información disponible sobre el modelo.
- Es un programa abierto, es decir, los códigos fuente están presentes en la documentación inicial. Esto permite hacer modificaciones en el programa, bien para corregir errores, bien para adecuar la salida ó entrada de resultados a las necesidades del usuario.
- Es compatible con otros programas que permiten el estudio del medio receptor, como el WASP. El fichero de salida de resultados del SWMM puede leerse como fichero de entrada por el WASP sin transformación alguna.

Sólo se construirá un modelo en una cuenca piloto, que sienta las bases para una ampliación del proyecto, que no incluye la modelización. El proceso de calibración del modelo de las cuencas basado en el SWMM se planteará un ajuste de parámetros hidráulicos y de contaminación, y, en lugar de optar por un ajuste manual a estima, se utilizará un modelo numérico de resolución del problema inverso; en particular el modelo PEST ("Parameter Estimation"), que utiliza el conocido método de Levenverg-Mardquardt.

Como datos de comparación se construirán los "trenes de sucesos" (hidrogramas y polutogramas) de cada ciudad y se procederá a ejecutar el PEST.



SWMM permite trabajar con modelos de acumulación-lavado y transporte de contaminación. La calibración y validación de los parámetros que controlan dichos modelos es fundamental para poder extrapolar datos y poder disponer de una herramienta verdaderamente útil de simulación.

Una vez el modelo SWMM se considere calibrado y validado se procederá a ejecutarlo en simulación continua con todas los eventos de varios años. Para cada uno de los años se calcularán los balances de agua y de masa de contaminantes movilizadas. Estos datos serán comparados con los encontrados en la literatura internacional.

A partir de los hidrogramas y polutogramas estimados para un periodo prolongado se puede estimar la eficiencia de los sistemas de control y tratamiento de reboses (depósitos, etc), con vistas a proteger al medio receptor.

### Primeros resultados del análisis de datos

Del análisis de los primeros datos extraídos pueden destacarse las siguientes conclusiones generales:

Las cuencas de Barcelona y Valencia dan los caudales punta mayores, a pesar de ser más pequeñas que Madrid. El clima mediterráneo con sus lluvias punta de gran intensidad es el responsable de ese hecho.

Las concentraciones máximas y los valores de concentración medias (EMC) por evento de lluvia son similares para BOD, COD y SS en las cuencas de Barcelona, Madrid, Vitoria y Sevilla.

Los valores mayores de carga sólida se dan en las cuencas de Barcelona y Valencia. La explicación es que se puede deber a que el arrastre de contaminantes existentes en la red de drenaje es mayor. Con su clima mediterráneo, para evacuar los elevados caudales de diseño estas ciudades tienen grandes colectores con pendientes bajas en las zonas de desembocadura (secciones rectangulares de 6 m de ancho ó más) que

favorecen la deposición de sólidos. La circulación de caudales de agua de lluvia provoca una resuspensión de los sedimentos existentes. Como el alcantarillado actual es de tipo unitario, este problema es de difícil solución.

La gran mayoría de carga sólida está asociada a la escorrentía de lluvia. Esta polución procede bien de la superficie de la cuenca, bien de los sedimentos existentes en la red. Este último proceso puede explicar los valores observados en la cuenca de Barcelona.

Se observa un ligero efecto de primer lavado o first flush, que pone en cuestión la eficiencia de un depósito de almacenamiento. Aproximadamente, un 30% del primer volumen de escorrentía, recogería menos del 50% de la carga contaminante.

En general los valores medidos están por encima de los observados en otros estudios de otros países. La construcción de alcantarillados separativos puede ser una medida que reduzca las cargas contaminantes vertidas debidas a los sedimentos acumulados en tiempo seco.

## **EFFECTO SOBRE EL MEDIO RECEPTOR: EL CASO DEL RIO LLOBREGAT EN BARCELONA**

El objetivo de este estudio es analizar la evolución temporal en un caso concreto como es el del río Llobregat, próximo a la ciudad de Barcelona, de los vertidos en tiempo de lluvia procedentes desde redes unitarias de alcantarillado (los llamados CSO Combined Sewer Overflow o Vertidos Urbanos en Tiempo de Lluvia) tomando básicamente como indicadores las concentraciones de oxígeno disuelto, amoníaco y de fósforo - ortofosfato. Se han elegido estos tres compuestos por sencillez en la descripción del medio fluvial y por considerarlos en general como tres de los más significativos.

El río Llobregat es el más importante en el entorno de Barcelona. Presenta un régimen de caudales muy irregular, de manera que en los meses de verano el caudal circulante es inferior a los  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , de manera que en muchos días nos encontramos con  $6$  ó  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ . El problema es especialmente agudo en el tramo final (últimos  $10 \text{ Km}$ ) pues parte del caudal circulante se toma en la planta potabilizadora para el suministro de la ciudad. Nos encontramos a veces con un tramo final por el que circulan  $2$  ó  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . En esas condiciones, una lluvia genera unos caudales de escorrentía muy superiores a los que circulan por el río y con una carga contaminante importante.

Los primeros desarrollos dieron lugar a la elaboración de un modelo inicial puesto a punto en 1998 que se centraba en la evaluación de la variación temporal y espacial de los niveles de oxígeno disuelto del medio receptor, estudiando la interacción entre la eliminación de la materia orgánica y el consumo de oxígeno asociado. Ahora, este modelo se ha ampliado introduciendo en su formulación las modificaciones adecuadas que permiten conocer la variación de los niveles de nitrógeno y fósforo, en sus diversos

estados (orgánico, inorgánico, etc.), causados por las descargas en tiempo de lluvia procedentes de las redes de saneamiento en el río.

El análisis se estructura en dos fases:

- La primera fase proporciona los polutogramas e hidrogramas en los puntos de vertido de las cuencas en estudio. Los polutogramas son la representación de la concentración-tiempo de un contaminante y caracterizan la respuesta de una cuenca urbana frente a un episodio de precipitación. En este caso se simula el proceso de acumulación de contaminantes en zona urbana, el lavado y arrastre por el proceso de lluvia y el vertido al cauce del río, después de la derivación de caudal a través de los colectores interceptores paralelos al cauce del río.
- La segunda fase propaga en el río los polutogramas e hidrogramas obtenidos en la primera fase. Se trata un modelo de propagación unidimensional que por un lado resuelve el flujo en el río mediante las ecuaciones de Saint-Venant (resolución cuantitativa), y por otro resuelve los balances máxicos de la propagación del vertido a través de la ecuación de advección-difusión (resolución cualitativa). La resolución cuantitativa recurre a un esquema en diferencias finitas implícitas (Preissmann) mientras que la solución de la parte cualitativa ha resultado algo más compleja, por la necesidad de la implementación de la ecuación de advección-difusión para cada uno de los distintos estados de los nutrientes, con las condiciones iniciales respectivas. Se ha utilizado un esquema tipo FTCS.

El análisis elaborado es totalmente aplicable a cualquier río y no es exclusivo en modo alguno para el río Llobregat, aunque en el transcurso del estudio siempre se haga referencia a él. Para su aplicación a otro río u otras cuencas basta con la modificación de los distintos datos de entrada en los respectivos archivos de datos. Por la misma razón puede decirse que el modelo ha quedado totalmente dispuesto para aplicarse a la nueva situación que se producirá una vez realizado el desvío del río y cuando se hayan llevado a cabo todas las actuaciones propuestas por el Pla de Sanejament de Catalunya, como la construcción de la Depuradora del Prat.

## **HIDROGRAMAS Y POLUTOGRAMAS DE VERTIDO**

### **Acumulación de los contaminantes en la cuenca urbana**

Sólidos, materia orgánica, metales pesados y nutrientes junto con otras sustancias de origen diverso son los constituyentes de los residuos urbanos. Todas estas sustancias se depositan y almacenan en la superficie de la cuenca urbana que actúa como un depósito, a la espera del hidrograma respuesta a la precipitación que provocará su movilización y transporte.

## Movilización y lavado durante la precipitación

Durante un periodo de precipitación se produce la erosión, solubilización y lavado de la cuenca, provocado por el flujo hidráulico que moviliza y transporta los contaminantes que se han acumulado en tiempo seco. Se ha supuesto que las calles funcionan como una prolongación del sistema de drenaje, aunque en el modelo propuesto se restringe al lavado de los sólidos de la propia cuenca.

## Información y datos

En esta parte del modelo se requieren toda una serie de datos como las características de las cuencas a tratar, los coeficientes de proporcionalidad entre los distintos contaminantes y los sólidos, etc., que son los que se han expuesto a continuación.

- Características geométricas básicas de las cuencas de aportación

El tramo del río Llobregat estudiado es el comprendido entre el núcleo urbano de Sant Boi de Llobregat (aguas abajo de la planta potabilizadora de Sant Joan Despí) hasta el mar. Son unos 10 Km de río que recogen las aportaciones pluviales de una cuenca urbana con un sistema unitario de drenaje, y que consta de diversos municipios pertenecientes a la comarca del Baix Llobregat: Sant Boi de Llobregat, Sant Joan Despí, Cornellà de Llobregat, Esplugues de Llobregat y L'Hospitalet de Llobregat.

El esquema de drenaje de la cuenca es el siguiente. La numeración de cuencas se inicia en el extremo aguas arriba del tramo de cauce objeto de estudio.

<b>Características Geométricas Básicas</b>				
	Área (Ha.)	Longitud del colector principal (m)	Pendiente (%)	Coefficiente de impermeabilización
1	42.75	1825	2	1
2 baja	153.00	2400	2	1
2 cabecera	54.65	750	2	1
3 baja	118.03	2625	2	1
3 cabecera	57.07	500	2	1
4	102.19	875	2	1
5	476.05	4850	2	1
6	125.16	3475	2	1
7	40.67	1125	2	1
8	139.75	3125	2	1
9	266.11	2775	2	1

Todos estos datos han sido facilitados por EMSSA (Empresa Metropolitana de Saneamiento, S.A.).

•Coeficientes de proporcionalidad de los distintos elementos respecto a los sólidos en suspensión:

Los coeficientes de proporcionalidad utilizados entre un elemento determinado y los sólidos en suspensión son los mismos para todas las cuencas, y se presentan a continuación. Son extraídos de datos de cuencas de estudio similares a las objeto de análisis.

Fracciones de los contaminantes más habituales (mg/g)							
DBO	Nitrógeno Amoniac	Nitrógeno Nitrato	Nitrógeno Fitoplancton	Nitrógeno Orgánico	Fósforo Fitoplancton	Fósforo Orgánico	Ortofosfato
30	0.656	0.08	0.0	0.064	0.0	0.2	0.8

De las fuentes citadas se obtienen solamente los valores de nitrógeno total y de ortofosfato. Para conocer los valores restantes se ha asumido que la distribución del nitrógeno total es de un 80-85% en amoniac, un 10-12% en nitrógeno nitrato y el resto en nitrógeno orgánico, mientras que la del fósforo total es de un 80% de ortofosfato y un 20% de fósforo orgánico aproximadamente. Esta suposición se hace bajo la base de los estudios realizados por Martin y Yousset (1993).

Se han utilizado dos tipos de datos de precipitaciones: Precipitaciones reales pertenecientes a un banco de hietogramas reales registrados en una de las subcuencas estudiadas y lluvias sintéticas de periodos de retorno. En el primer caso se refiere a la cuenca de la Riereta, en el municipio de Sant Boi, de 42.7 ha de carácter totalmente urbano. Su instrumentación parcial con pluviómetros y medidores de caudal permiten disponer de hietogramas perfectamente representativos de las lluvias habituales en la cuenca problema. Son lluvias comunes, ordinarias y no excepcionales, que son las que realmente interesan, al ser las que afectan más directamente a la calidad del río.

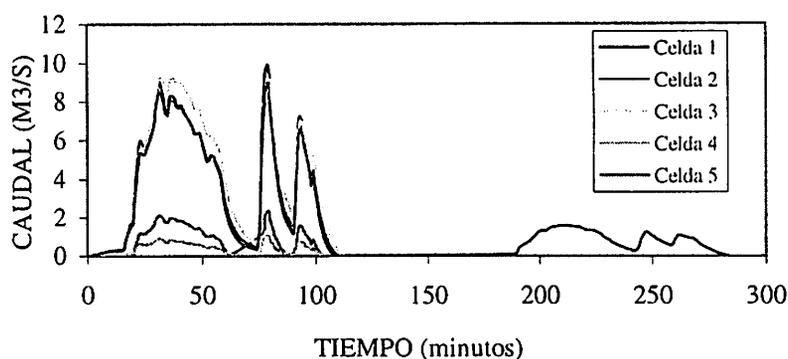
Parámetros representativos de los hietogramas reales medidos en la cuenca de la Riereta					
Lluvias	Volumen (mm)	Duración (min.)	Intensidad media (mm/h)	Intensidad máxima (mm/h)	Tiempo pico (min.)
30/01/96	9.2	100	5.5	17.0	84
23/04/95	15.6	168	5.6	37.0	64
24/04/95	11.6	187	3.7	12.5	67
11/05/95	5.0	37	8.1	38.9	14
09/06/95	5.4	95	3.4	19.9	58
12/06/95	6.7	99	4.1	18.0	76
22/11/95	5.0	43	7.0	22.3	28

## RESULTADOS

Como resultado de esta primera fase se obtienen los hidrogramas y polutogramas para los distintos contaminantes consecuencia de las distintas precipitaciones. Son los vertidos contaminantes que se producen en cinco puntos a lo largo del tramo de río estudiado. Estos cinco puntos están en las siguientes secciones:

- Punto 1: Sección 2, 67.17 m respecto al origen del estudio.
- Punto 2: Sección 6, 517.447 m respecto al origen del estudio.
- Punto 3: Sección 8, 760.604 m respecto al origen del estudio.
- Punto 4: Sección 12, 1219.899 m respecto al origen del estudio.
- Punto 5: Sección 28, 3028.877 m respecto al origen del estudio.

Tanto en los hidrogramas como en los polutogramas podemos ver que en el punto de vertido 1, se presentan dos fases, una primera fase más importante asociada a las cuencas bajas y la segunda fase asociada a las cuencas de cabecera. Esta segunda fase solamente se presenta en el punto de vertido 1 porque éste incluye las cuencas 2 y 3 que son las únicas que presentan cuencas de cabecera.



### Hidrograma de respuesta ante la precipitación del 12/06/95

Examinando los datos se corrobora lo que Bertran (1998) ya puso de manifiesto: las cifras de los caudales descargados en el río son en cada punto de vertido del mismo orden de magnitud o mayores al caudal de circulación propio del río.

Respecto a los valores cualitativos se comprueba que a mayores caudales medios, se vierten concentraciones medias más bajas de los distintos contaminantes estudiados. Éste es un resultado esperado si se razona que la masa de contaminantes acumulados en todos los casos es la misma, de 250 kg/ha, y al llover los caudales mayores hacen que las concentraciones se diluyan y sean menores.

Por lo tanto se cumple que a mayor periodo de retorno menores son las concentraciones de contaminantes que se vierten al río, pero no así la cantidad

de masa total vertida de contaminante, que es aproximadamente la misma para todos los periodos de retorno estudiados.

En el caso de lluvias ordinarias las concentraciones de amoniaco medias son de 4.5 a 6 mg/l en cuencas grandes y de 6 a 11 mg/l en las pequeñas. Si se examinan las concentraciones punta estos valores aumentan hasta 11.5-14.5 mg/l en las cuencas grandes y de 13.5 a 17 mg/l en las pequeñas. Tratándose del ortofosfato las concentraciones son menores y no presentan diferencias entre cuencas pequeñas y grandes: las concentraciones medias se encuentran entre 1.3 y 2.8 mg/l, y las concentraciones punta van de 3.5 a 3.8 mg/l.

Los valores que se presentan en las lluvias extraordinarias son más reducidos como ya se ha comentado anteriormente. En el caso del amoniaco las concentraciones medias van de 1.7 a 4.5 mg/l en las cuencas pequeñas y de 1.8 a 2.5 en las grandes, mientras que las puntas van de 12 a 15 en las pequeñas y de 10 a 13 en las grandes. Con el ortofosfato ocurre igual que en el caso de las lluvias ordinarias, no existe diferencia en el rango de valores entre las cuencas pequeñas y las grandes: se vierten entre 0.7 y 1.3 mg/l como media, con unas puntas entre 3 y 3.5 mg/l.

## **PROPAGACIÓN EN EL RÍO**

En esta segunda fase se modela la propagación de los polutogramas en el río, el medio receptor. Los contaminantes son trasladados, dispersados, sedimentados, eliminados, regenerados o modificados en la propagación según sus características.

El estudio se subdivide en dos fases:

- La primera en la que se resuelve cuantitativamente el proceso, la solución hidrodinámica del flujo, mediante las ecuaciones de Saint-Venant.
- La segunda fase en la que se analiza el aspecto cualitativo del problema, a través de la ecuación de advección-difusión en un proceso determinista.

La finalidad del estudio es conocer los efectos que los contaminantes, especialmente el amoniaco y el ortofosfato (que son indicadores de la calidad del agua), producen en el río, y ver si estos efectos sobre el medio pueden valorarse como impactos. Al ser la composición de los CSO tan variada, sólidos, materia orgánica, nutrientes, metales, bacterias y otras sustancias, los efectos también serán muy variados, y en muchas ocasiones causados por la combinación de más de un contaminante.

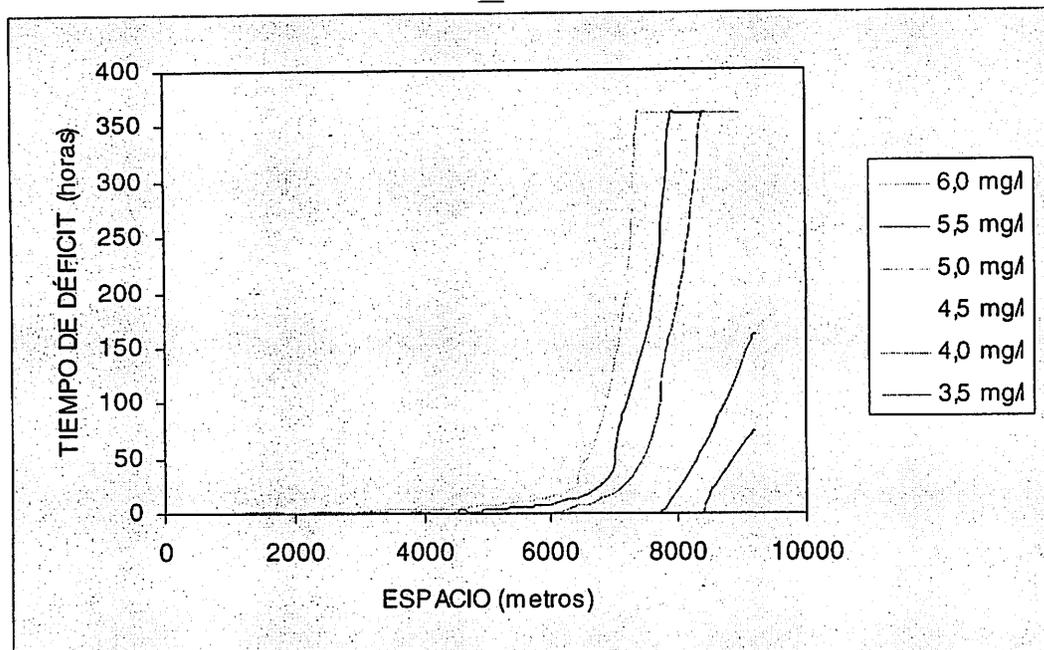
## **RESULTADOS**

Se aplica el modelo a las condiciones determinadas por los estudios de la calidad del Llobregat, en la estación de aforos del Sedó (actualmente inexistente por las obras realizadas para la autovía del Baix Llobregat), que pueden considerarse como condiciones aceptables.

En todos los casos se trabaja con un caudal base de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , resultado del caudal natural del río estimado en  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  por el CDM (Análisis de las condiciones presente y futuras en el río Llobregat en las cercanías de su descarga al mar. Anejo: Estudio de reutilización de las aguas residuales en el Área Metropolitana de Barcelona, zona Llobregat), mas un caudal recirculado desde la futura Planta del Prat de unos  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## ANALISIS DE LOS RESULTADOS

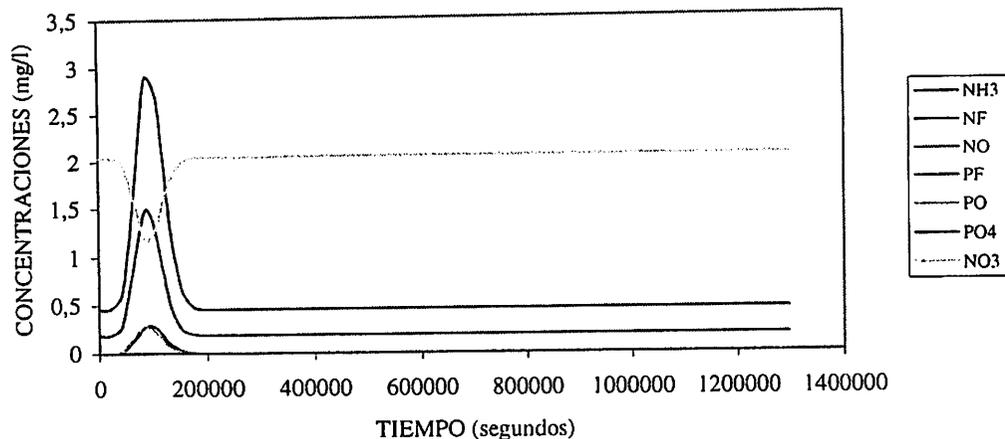
Podemos presentar los resultados en tiempo de déficit de oxígeno disuelto de todo el tramo de río objeto de estudio. En la figura siguiente se muestra para los aproximadamente 10 Km del río, el tiempo de déficit en horas para unos niveles de referencia acordes con los objetivos de calidad del río. Si por ejemplo exigimos un mínimo de  $6 \text{ mg/l}$  de  $\text{O}_2$  nos encontraremos que los dos o tres últimos kilómetros de río pueden incumplir el objetivo de calidad durante casi dos semanas.



Esto se debe a la morfología del río que cambia en ese último tramo convirtiéndose en un cauce de menor pendiente y mayor calado. Incluso si nuestros objetivos de calidad son más modestos, entre 3 ó  $4 \text{ mg/l}$ , aún tenemos un incumplimiento de los niveles de oxígeno exigidos en los últimos 2 Km entre 20 y 60 horas.

## EVOLUCIÓN TEMPORAL PARA EN NITROGENO Y EL FOSFORO

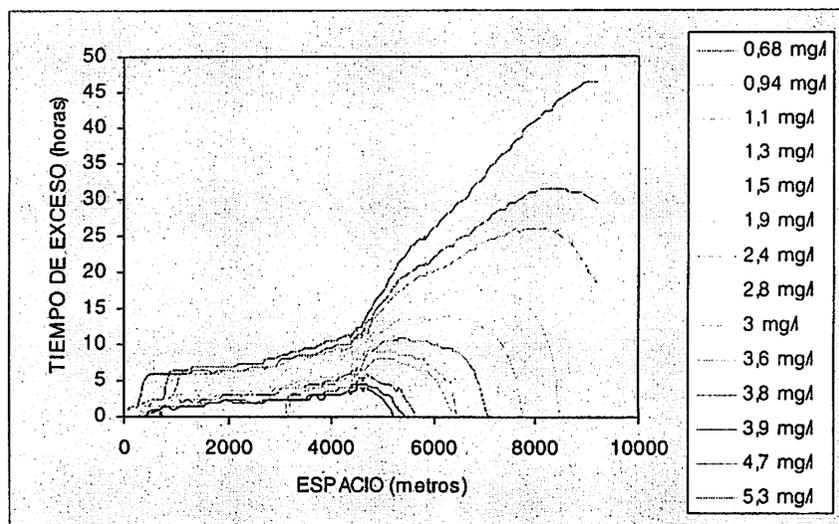
Las secciones 52, 79 y 106 se han tomado como referencia para realizar este análisis, al ser las secciones más problemáticas del río. A continuación solamente se adjuntan las gráficas de la sección 79.



### Evolución temporal de las concentraciones de N y P en la sección 79 para la precipitación del día 12/06/95

Sobre la evolución espacial puede analizarse el comportamiento de los ciclos de los elementos. El efecto más apreciable es la relación entre el nitrato y el amoníaco. Con el tiempo, la concentración de amoníaco decrece mientras que la del nitrato aumenta a causa de la interacción existente entre ellos por la nitrificación. Este comportamiento se repite en todos los estudios.

Ante estos resultados puede decirse que frente a la mejoría que se espera en las aguas de los últimos kilómetros del Llobregat hasta la desembocadura, los vertidos en tiempo de lluvia se presentan como un agente contaminante que provoca efectos en el agua que pueden causar impactos graves.



Podemos presentar de igual manera a lo realizado para el oxígeno disuelto, el tiempo de déficit sobre una concentración de referencia de NH4. En estas condiciones para el caso de estudio tenemos la siguiente gráfica que muestra que para concentraciones de referencia por debajo de 1 mg/l, tenemos un tiempo de duración mayor a las 20 horas en que no se cumple este valor máximo, para los últimos 4 Km del río.

## CONCLUSIONES

Se han presentado las bases de trabajo del programa PROMEDSU desarrollado desde el Ministerio de Medio Ambiente español. Se han seleccionado 5 ciudades con climas mediterráneos, continental y oceánico. Se evalúan los datos de concentraciones del polutograma de vertido a los medios receptores, así como los datos hidrológicos de los sucesos de lluvia. De las primeras evaluaciones de datos obtenidos se puede indicar que:

Las cuencas de clima mediterráneo son las que están dando mayores caudales y mayores cargas contaminantes.

La carga contaminante del vertido es mayor en aquellas ciudades con redes de drenaje unitarias y con secciones grandes, diseñadas para permitir la circulación de caudales grandes. La acumulación de sólidos en tiempo seco contribuye a que durante el suceso de lluvia se viertan mayores cantidades de sedimentos al medio receptor. La construcción de redes separativas podría permitir reducir esos volúmenes de sedimentación.

Se aprecia un ligero efecto de first flush pero no muy importante, lo que pone en duda en algunas cuencas la eficacia de depósitos de retención.

En general las medidas de sólidos en suspensión, COD, etc. están por encima de los datos registrados en otros países. Este hecho confirma la necesidad de estudios de campo en cada ciudad o país.

Se ha presentado un análisis de influencia de los vertidos en el tramo final del río Llobregat, poniendo de manifiesto los problemas en su tramo final para un vertido cualquiera. Durante muchas horas se incumplen los objetivos de calidad que se fijan para el cauce.