

ESTUDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE SEDIMENTACIÓN EN COLECTORES DE VALDEBERNARDO

STUDY TO LOCATE SEDIMENTATION AREAS IN SEWERS IN VALDEBERNADO

FRANCISCO PEÑALVER. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe del Departamento de Alcantarillado, Ayuntamiento de Madrid

POUL KRONBORG. Ingeniero Medioambiental
Director DHI España

CARMEN DE MIGUEL. Ingeniero Agrónomo
Ingeniero de proyecto, DHI España

RESUMEN: En el presente artículo se describen los trabajos y resultados de un estudio piloto llevado a cabo para definir una metodología con la que abordar en una primera aproximación el análisis del transporte de sedimentos en redes de saneamiento, con motivo del interés por parte del Ayuntamiento de Madrid por conseguir una planificación más racional de las tareas de limpieza de estos sistemas. El estudio se ha limitado a la zona de la Urbanización de Valdebernardo, en Madrid, que cubre un área de 75 ha aproximadamente.

Se ha empleado el software de modelización MOUSE para la confección y calibración de un modelo hidrodinámico del sistema de saneamiento, sobre el que se ha simulado el transporte potencial de sedimentos en tiempo seco y con lluvia, realizando para esta última una simulación a largo plazo con las tormentas de Madrid de los años 1981 a 1986. Los resultados de las simulaciones se han verificado con datos tomados en campo y han permitido clasificar los tramos de la red según la frecuencia de movilización de sedimentos.

Los resultados del estudio indican que el ahorro potencial que se conseguiría al aplicar esta metodología sería muy importante.

PALABRAS CLAVE: ALCANTARILLADO, MODELIZACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, OPTIMIZACIÓN LIMPIEZA

ABSTRACT: The present article describes the work and results of a pilot study carried out in order to define a method which would provide a preliminary estimation of the transport of sediment in drainage networks. This work was carried out on the instigation of the Madrid City Council in order to obtain a more rational planning for the cleaning of these systems. The study has been limited to the Valdebernado Housing Estate in Madrid which covers an area of approximately 75 ha.

MOUSE modelling software has been employed to establish and gauge a hydrodynamic model of the drainage system. The potential transport of sediment had been simulated on this model under both dry and wet weather conditions. In this latter instance a long term simulation was carried out on the basis of the storms in Madrid from 1981 to 1986. The results of these simulations have been verified by field data and has enabled a classification of drainage sections according to the frequency of sediment movement.

The results of the study indicate that very large potential savings may be obtained through the application of this method.

KEYWORDS: SEWER SYSTEM, SEDIMENT TRANSPORT MODEL, OPTIMIZATION OF CLEANING TASKS

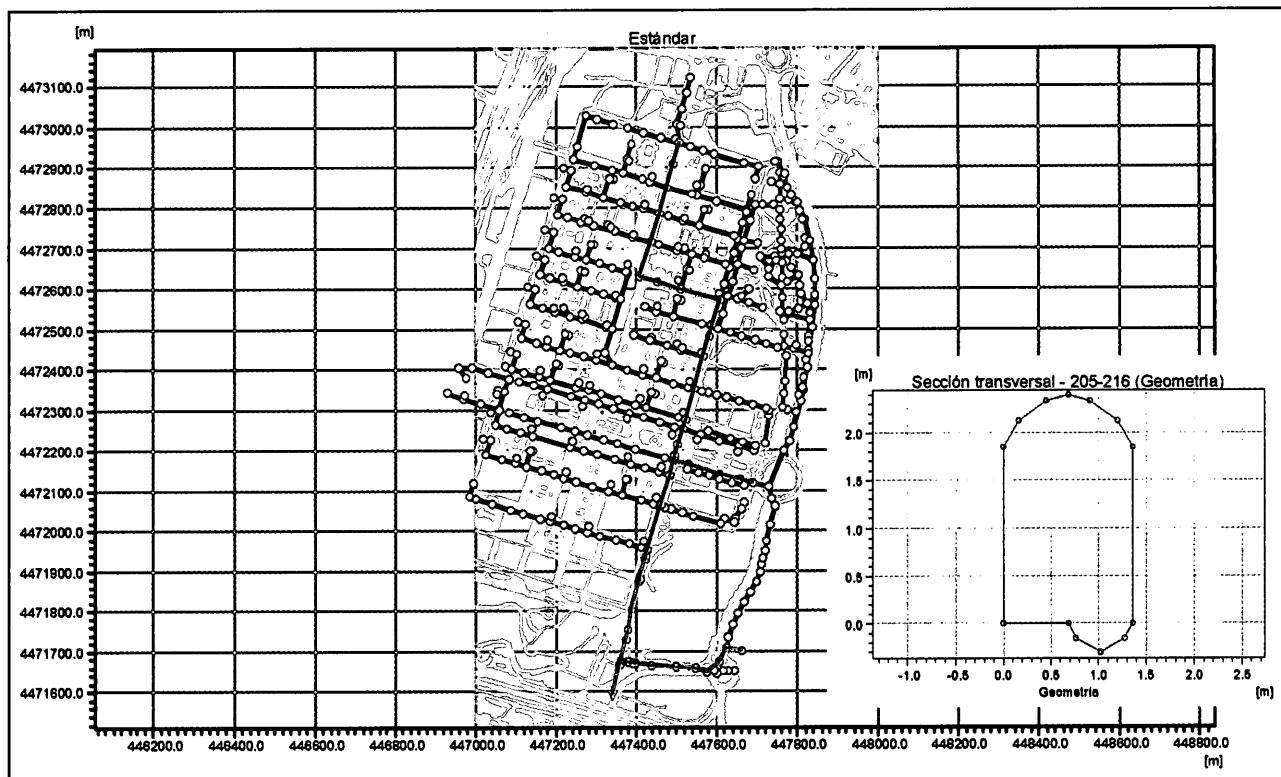
INTRODUCCIÓN

La realización de este trabajo responde a la inquietud que existe en el Ayuntamiento de Madrid por desarrollar una mayor racionalización y eficiencia en las tareas de limpieza de la red municipal de alcantarillado. La consecución de este objetivo implica la limpieza selectiva del sistema,

con lo cual se garantiza su correcto funcionamiento, a la vez que se reduce considerablemente el elevado coste económico que dicho trabajo lleva tradicionalmente asociado.

Los depósitos de sedimentos en una red de alcantarillado suponen la modificación de las características hidrodinámicas de la corriente, debido a la reducción de la sección de las conducciones y la modificación de la resistencia al

Figura 1. Red de saneamiento de Valdebernardo. En negro: colectores tubulares, en rojo: galerías (sección tipo a la derecha).



flujo. La eliminación de dichos depósitos constituye por tanto una tarea prioritaria en la explotación de la red. En la mayoría de los casos, estos trabajos se programan siguiendo unos criterios que no responden a las necesidades reales del sistema, dando lugar a la limpieza indiscriminada de todos los tramos, con el elevado coste económico que ello supone. Dado que el depósito y arrastre de material sólido no se realiza uniformemente en todos los tramos, no será necesario limpiar los mismos con igual frecuencia. Por ello y para conseguir una programación de los trabajos más eficiente y racional, es necesario conocer cómo son los patrones de sedimentación o cuáles son las zonas más susceptibles a acumular sedimentos y cuáles los tramos con menor probabilidad de presentar depósitos de material.

Los modelos de transporte de sedimentos caracterizan la dinámica asociada al transporte de sólidos en la red, permitiendo predecir zonas donde se producirá erosión del material acumulado y zonas donde tendrá lugar el depósito del mismo. Suponen por tanto una inestimable ayuda en la planificación y optimización de las operaciones de limpieza y conservación de dichas redes.

En este estudio piloto realizado para una zona de Madrid, la Urbanización de Valdebernardo, de topología y topografía bien conocidas, se pretende iniciar un análisis racional del transporte de sedimentos en los sistemas de saneamiento. La metodología seguida ha consistido en primer lugar en el establecimiento y calibración de un modelo hidro-

lógico e hidrodinámico detallado de la zona en estudio, y en su posterior aplicación a la simulación del transporte potencial de sedimentos en la red, para obtener finalmente una clasificación de los tramos del sistema según sus necesidades de limpieza.

El software aplicado para el estudio de modelización de la red de saneamiento de Valdebernardo ha sido MOUSE /1/, desarrollado por DHI Water & Environment (anteriormente Danish Hydraulic Institute).

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La red de saneamiento de la Urbanización de Valdebernardo recoge las aguas residuales y pluviales de un área de algo más de 75 ha., de las cuales aproximadamente el 85% corresponden a zonas de calles y viviendas, siendo el 15% restante zonas verdes —ubicadas en la zona noreste de la urbanización. El número de habitantes equivalentes a que dicha red presta servicio es de algo más de 18.000. Los caudales de aguas negras proceden de usos domésticos y comerciales principalmente.

La red es de tipo unitario, siguiendo el trazado de las calles (Figura 1). En ella se pueden diferenciar unos 14 Km. de colectores tubulares, de diámetros comprendidos entre 300 y 600 mm y un tramo en galería de aproximadamente 2 Km. de longitud, que recoge todas las aguas y las condu-

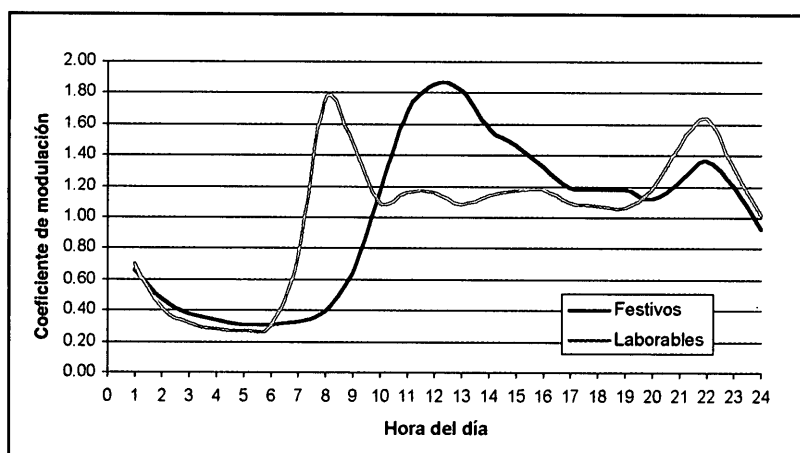


Figura 2. Curvas de modulación del caudal de agua residual

ce hacia la conexión con la red principal del Ayuntamiento (ver sección tipo en Figura 1). La conducción se realiza por gravedad en toda la zona.

MODELO HIDRODINÁMICO

El modelo hidrodinámico del sistema se ha construido con gran nivel de detalle, sin eliminar los pequeños colectores de las cabeceras ni las ramificaciones, para estudiar el posible depósito de sedimentos en todos los tramos de la red.

Modelo hidrológico

En primer lugar se ha establecido un modelo hidrológico con la división del área en estudio en cuencas vertientes asociadas a la red de colectores, de acuerdo con el nivel de detalle exigido para el modelo, el trazado de la red, los diferentes usos del suelo y las características topográficas del terreno. Se han diferenciado 303 subcuencas, las cuales se han caracterizado mediante sus parámetros geométricos e hidrológicos.

Para la generación de los hidrogramas de lluvia, se ha empleado en este estudio una rutina de lluvia-escorrentía basada en el método de la onda cinemática. Este modelo calcula la precipitación efectiva deduciendo de la precipitación total las pérdidas producidas por los siguientes procesos hidrológicos: humedecimiento inicial, infiltración y almacenamiento en superficie. La circulación del exceso de lluvia se realiza mediante el modelo de la Onda Cinemática.

Modelo hidráulico

Se ha confeccionado el modelo hidráulico de la red a partir de la definición del sistema de colectores. Este modelo recibe los aportes de aguas residuales de las cuencas y los hidrogramas de escorrentía superficial generados por el mo-

delo hidrológico. Los caudales de aguas residuales se generan en MOUSE por el "Generador de Caudal en Tiempo Seco", para un caudal medio de 250 l/PE/día y unas curvas de modulación para días laborables y festivos calculadas a partir de las mediciones de caudal realizadas en la zona para este trabajo (Figura 2).

La unión de ambos modelos, hidrológico e hidráulico, da lugar al modelo hidrodinámico del sistema de drenaje de la zona. Este modelo se simplificó un 15%, para obtener una red más operativa y eficiente desde el punto de vista computacional y optimizar las simulaciones con el módulo de transporte de sedimentos.

Los cálculos del modelo hidrodinámico están basados en la solución de la "onda dinámica", que contempla la formulación completa de la ecuaciones de Saint Venant, incluyendo los términos de inercia en la ecuación de momento para la correcta formulación de los posibles efectos de remanso en la red.

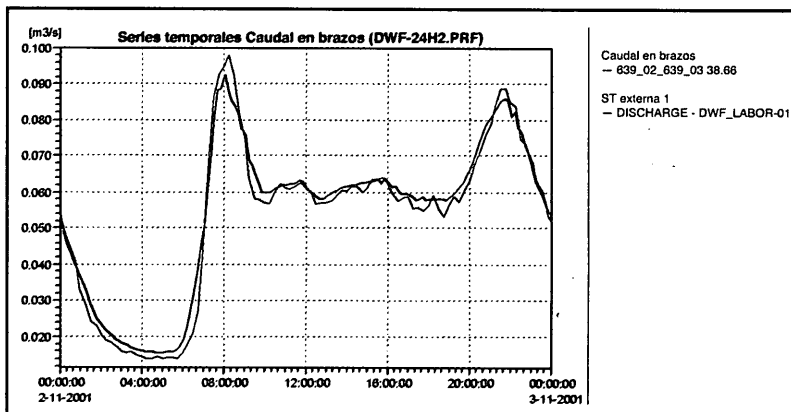
Calibración del modelo hidrodinámico

Dada la dependencia no lineal entre el transporte de sedimentos y la velocidad del flujo, la calibración del modelo hidrodinámico resulta fundamental para reproducir adecuadamente los procesos asociados con el flujo de sólidos en la red de saneamiento.

El modelo hidrodinámico se ha calibrado tanto para tiempo seco como para lluvia. Para la calibración se han utilizado datos de lluvia del pluviómetro 27 del Ayuntamiento de Madrid, emplazado en la zona, y de caudales medidos cada quince minutos en el punto de salida del modelo durante el periodo 11/04/01-11/05/01. El caudal medido en este punto corresponde a toda el agua recogida por la red de la urbanización. Para la calibración se ha comparado el volumen total y los valores instantáneos de caudal medidos y simulados, tanto en tiempo seco como para las lluvias de los días 17/04/01 y 09/05/01.

En la calibración en tiempo seco se han ajustado los parámetros hidráulicos del modelo. El resultado se muestra en

Figura 3. Calibración en tiempo seco. Caudal medido (azul) y simulado (negro).





AMARRE EN MARINA PORT VELL

Y conozca las ventajas de tener su propio
amarre en el corazón de Barcelona

410 amarres hasta 110 m de eslora

Disfrutando de todo lo que su embarcación necesita:

- agua
- electricidad
- tv cable
- teléfono
- servicios de asistencia, mantenimiento y reparación.

Con todas las medidas de seguridad necesarias:

- pantalanés cerrados
- vigilancia
- cctv, etc.

Próxima Apertura de la Nueva Bocana del Puerto de Barcelona

Llame para informarse o consulte nuestra web www.marinaportvell.com T. (+34) 93 484 23 00 . F (+34) 93 484 23 33 . info@marinaportvell.com



Cintra
APARCAMIENTOS
una empresa
ferroviaria

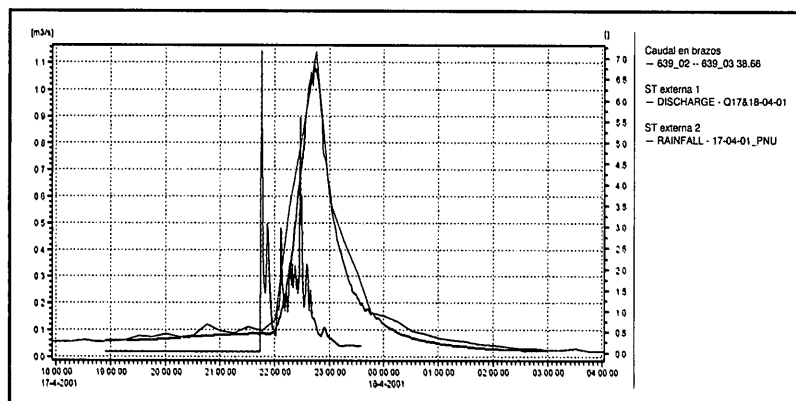


Figura 4.
Calibración con lluvia. Caudal medido (azul) y simulado (negro) para la lluvia del 17/04/01 (verde).

la figura 3, en la que se compara el caudal medido (azul) con el caudal simulado (negro) durante 24 horas para un día laborable.

Durante la calibración con lluvia se han ajustado los parámetros hidrológicos definidos para el modelo. En las figuras 4 y 5 se muestran las curvas de los caudales medidos (en azul) y calculados (en negro) para las lluvias de los días 17/04/01 y 09/05/01 (en verde).

Al analizar los valores simulados y medidos, la coincidencia en los valores punta, la similitud en el volumen total calculado y el medido, así como la estimación del error, indican que la calibración puede considerarse como muy aceptable.

MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Generalidades del modelo

El modelo de transporte de sedimentos de Valdebernardo se ha construido sobre el modelo hidrodinámico calibrado del sistema. El software empleado en la modelización ha sido el módulo LTS (Long Term Simulation) para simulaciones a largo plazo de MOUSE, conjuntamente con el módulo ST (Sediment Transport) de transporte de sedimentos /2,3/.

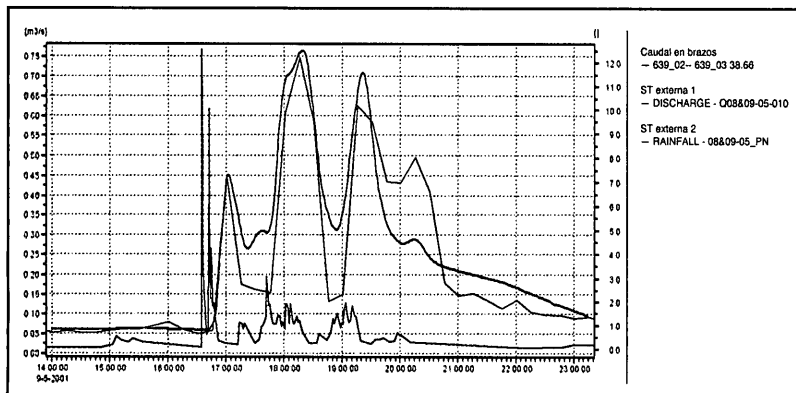


Figura 5.
Calibración con lluvia. Caudal medido (azul) y simulado (negro) para la lluvia del 09/05/01 (verde).

De los distintos modelos de transporte de sedimentos implementados en MOUSE ST, se ha utilizado el modelo de Engelund-Hansen de 1967 /4/, que calcula el transporte total de sedimentos en los colectores de la red como función del esfuerzo cortante adimensional de fondo y un factor de fricción que a su vez depende de la velocidad de fricción y la velocidad del flujo.

La ecuación de transporte de sedimentos de Engelund-Hansen es la siguiente:

$$\Phi = \frac{0.1}{f} \cdot \theta^{5/2}$$

donde

θ es el esfuerzo cortante adimensional o parámetro de Shields (1936, /5/), que responde a la ecuación

$$\theta = \frac{\tau/p}{(s-1) \cdot g \cdot d}$$

en la que τ es el esfuerzo cortante de fondo, p es la densidad del agua, s es la densidad relativa del material del fondo, d es el tamaño medio de grano de dicho material y g es la aceleración de la gravedad.

f es el factor de fricción, definido como $2 \cdot u_f^2 / u^2$, siendo u la velocidad actual y u_f la velocidad de fricción.

Φ es el transporte de sedimentos adimensional, definido por la ecuación

$$\Phi = \frac{q_s}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3}}$$

donde q_s es el transporte total de fondo por unidad de anchura.

Para determinar si tendrá o no lugar el movimiento del sedimento se ha utilizado el concepto de esfuerzo cortante crítico, definido por Shields. El sedimento se movilizará cuando el valor del esfuerzo cortante adimensional iguale o supere el valor del esfuerzo cortante crítico, que según la aproximación de Van Rijn (1984, /5/) es función del número de partícula.

Campaña de toma de muestras de sedimentos

Se definió una campaña de toma de muestras de sedimentos en algunos puntos de la red de colectores de Valdebernardo, para caracterizar el material depositado y comprobar posteriormente las simulaciones realizadas con el modelo.



OBRAS REALIZADAS PARA PSIM II:

- Mejora de desagüe alcantarillado barrio Corralejo.
- Construcción del colector Santa Virgilia II.
- Construcción del colector prolongación de Curtidos.
- Mejora del nudo de alcantarillado de Arturo Soria - San Pablo.
- Construcción del colector Estrecho de Corea II.
- Construcción del colector Osa Mayor II.
- Ampliación de la red de colectores Paseo Chopera - Delicias.
- Mejora de la red de alcantarillado del Parque del Retiro.
- Mejora de la red de alcantarillado del Casco Histórico de Barajas.
- Construcción del colector central General Ricardos.

ELSAN-PACSA

2M12

Arturo Soria 336, 5º
28033 Madrid
Telf: 91 384 74 00

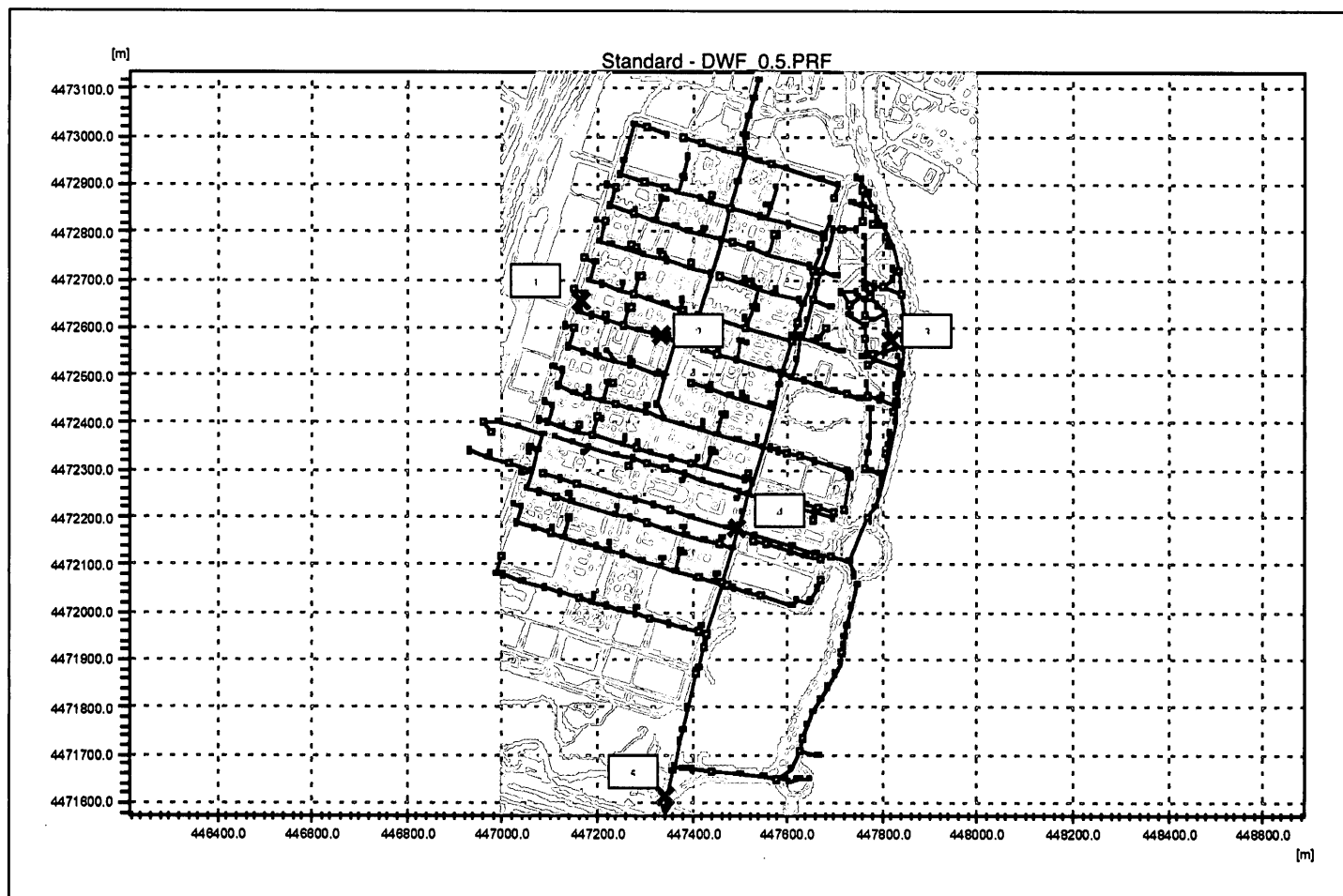


Figura 6.
Puntos para la
toma de
muestras de
sedimentos en
Valdebernardo.

Tras realizar unas primeras estimaciones del transporte potencial de sedimentos en la red, se propusieron cinco puntos en los que llevar a cabo la toma de muestras de sedimentos, tanto en periodos secos como inmediatamente tras episodios lluviosos. Los puntos, que corresponden a zonas en las que se observó que las condiciones dinámicas locales del flujo hacían probable la aparición de depósitos de material son, en concreto (ver Figura 6):

1. Tramo de cabecera de 400 mm de diámetro con disminución de pendiente, donde aparecerá probablemente el material de la superficie de la cuenca arrastrado durante las lluvias.
2. Tramo de 400 mm aguas abajo del colector correspondiente al punto 1, para ver la evolución de los materiales aportados por las cuencas y las aguas residuales.
3. Zona verde, en un tramo de 400 mm donde las velocidades son pequeñas.
4. Tras un rápido en la galería, probable depósito de material debido al cambio brusco de velocidad.
5. Zona de la salida del modelo, en galería, donde se encuentra situado el caudalímetro.

La campaña de toma de muestras de sedimentos se realizó durante el periodo Octubre 2000 – Mayo 2001. En este tiempo se midió periódicamente el espesor de la capa de material depositado en los cinco puntos de la red, y se analizó la granulometría del mismo. Los datos recogidos se muestran en la Tabla 1.

Los resultados del análisis granulométrico indican que el material encontrado en distintos puntos de la red es bastante uniforme. A partir de estos datos se ha tomado un tamaño medio de grano de 1,25 mm, con el que abordar las simulaciones y para verificar en cierta medida los resultados de las mismas. El valor del esfuerzo cortante crítico adimensional es de 0,0354 para este caso, de acuerdo con la curva de Van Rijn /5/.

SIMULACIONES DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El modelo se ha ejecutado de forma explícita, es decir, el transporte de sedimentos se simula utilizando los resultados de la simulación hidrodinámica y no se modifican los parámetros hidrodinámicos del sistema conforme avanza la

TABLA 1. DATOS DE LA CAMPAÑA DE TOMA DE MUESTRAS DE SEDIMENTOS EN COLECTORES

ESPESOR DE SEDIMENTOS (cm)					
Fecha	1	2	3	4	5
17/10/2000	1,5	2,5	7,0	3,0	0,0
22/10/2000	4,0	1,0	3,0	8,0	0,0
16/01/2001	10,0	3,0	10,0	0,0	0,0
06/02/2001	10,0	3,0	10,0	0,0	0,0
12/05/2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

GRANULOMETRÍA (tamiz UNE por el que pasa el 50%)					
Fecha	1	2	3	4	5
07/11/2000	1.25	2	0.08	3.2-2'	20-12.5'
27/11/2000	0.08''	1.25	1.25-0.40	1.25	-
19/01/2001	-	1.25	1.25-0.40	-	-
12/02/2001	0.08'''	0.08'''	1.25	-	-

(') Suelo con restos de materiales de construcción. (') Suelo con plástico
 (') Material antrópico, no existe material mineral.

simulación del transporte de sedimentos. De esta forma se obtiene en cada instante la capacidad de cada tramo de la red para transportar material.

Simulación en tiempo seco

Se ha realizado una simulación del transporte de sedimentos de 24 horas de duración en tiempo seco, cuyos resultados indican que durante estos periodos las condiciones hidrodinámicas del caudal de aguas negras hacen imposible en muchos tramos la movilización de material depositado o transportado en la red. Por tanto será durante las épocas sin lluvias cuando tenga lugar en mayor medida el depósito de sedimentos. Esto puede comprobarse en la Figura 7, en la que se muestra el valor máximo del esfuerzo cortante adimensional (parámetro de Shields) obtenido en cada tramo del modelo. Los tramos que aparecen en gris son aquellos en los que el esfuerzo cortante no supera el esfuerzo cortante crítico, que representa el umbral para la movilización del sedimento.

El colector en galería que recoge las aguas residuales de la zona tiene capacidad para movilizar el material durante tiempo seco.

Simulación con lluvia

Para el análisis de la capacidad de movilización del material durante las lluvias se ha empleado la serie histó-

ca de lluvias del observatorio de Retiro, del Instituto Nacional de Meteorología, en la cual se recogen las lluvias de los últimos 63 años en la capital. Se ha simulado el periodo comprendido entre los años 1981 y 1986 -ambos incluidos-, considerado representativo de toda la serie, y que incluye dos años con episodios de gran intensidad (1981 y 1986) así como años secos. Las características de la serie se resumen en la Tabla 2. Para la determinación del número anual de aguaceros, éstos se han considerado independientes cuando están separados por al menos 24 horas.

En la simulación a largo plazo se han eliminado los periodos secos y se han realizado simulaciones independientes para cada episodio de lluvia de la serie, partiendo en cada caso de las condiciones iniciales de caudal de aguas negras.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los gráficos en planta con los valores máximos del esfuerzo cortante crítico alcanzados durante los episodios más intensos para un año lluvioso y un año seco de la serie simulada. Como puede observarse, en la mayoría de tramos se supera el valor del cortante crítico al menos una vez al año, aunque existen algunos en los que no se alcanza. Estos tramos, correspondientes en su mayor parte a las cabeceras de la red en la zona de viviendas y a un gran número de tramos de la zona verde, serán los que tengan depósitos de sedimentos con mayor probabilidad, debido a que los aportes de caudal son menores en estas zonas y las pendientes son pequeñas. Este resultado se ha verificado con las medidas del espesor de la capa de sedimentos correspondientes a los puntos 1 y 3 (ver Figura 6), en los cuales se encontraron los mayores depósitos de material de todos los puntos analizados (ver Tabla 1).

Otros lugares donde se acumularán sedimentos son los tramos que están en contrapendiente, como el punto número 2 de la campaña de toma de muestras, así como los precedidos por tramos con pendientes elevadas, como por ejemplo el punto número 4, situado a continuación de uno de los rápidos del colector visitable.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGUACEROS DE LA SERIE 1981-1986 DE MADRID-RETIRO

Año	Precipitación anual (mm)	Nº de aguaceros	Int. máx. anual en 5 min. (mm/h)
1981	400,71	66	117,96
1982	345,81	56	23,86
1983	254,28	47	30,44
1984	447,04	67	34,66
1985	326,87	67	80,84
1986	376,29	69	103,93

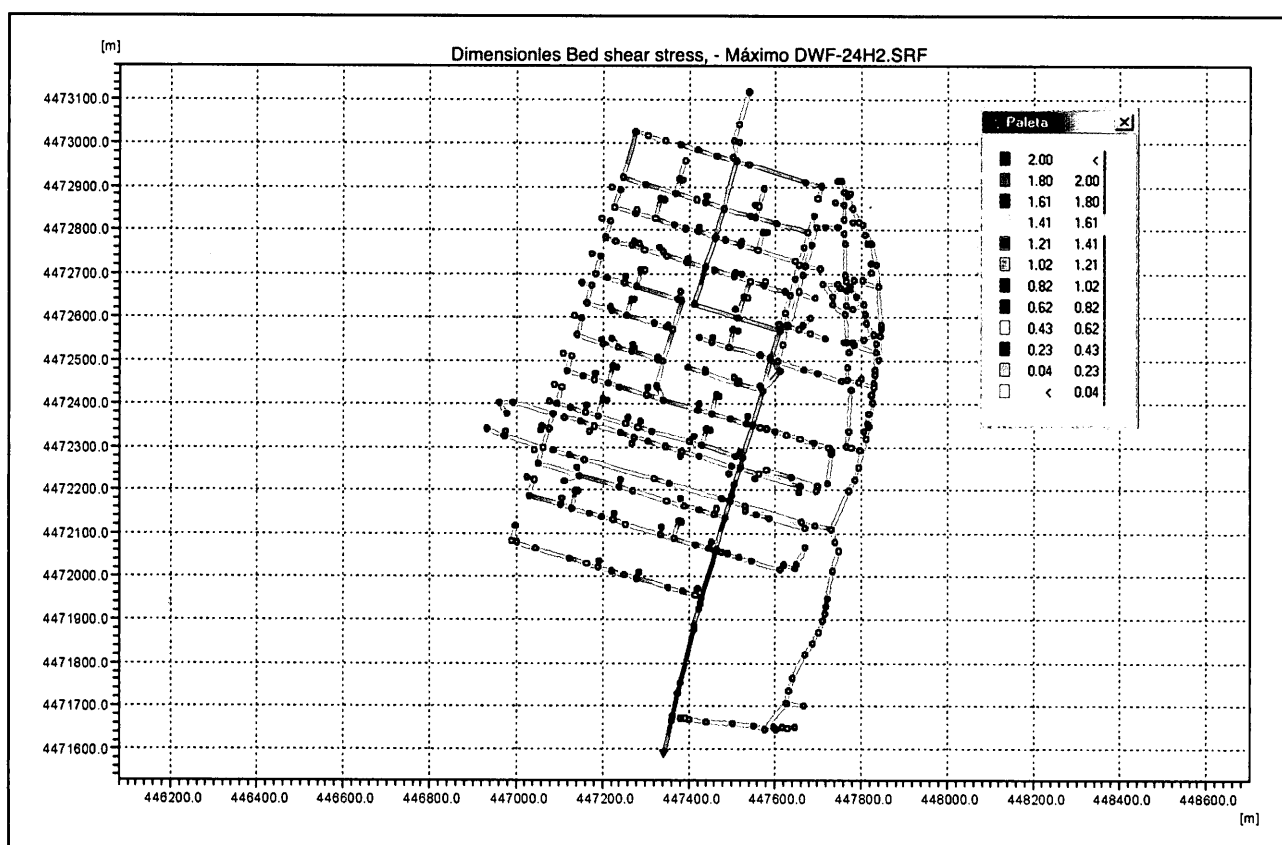


Figura 7. Valor máximo del esfuerzo cortante adimensional durante la simulación de 24 horas en tiempo seco. Los tramos en los que el sedimento no puede ser movilizado se representan en color gris.

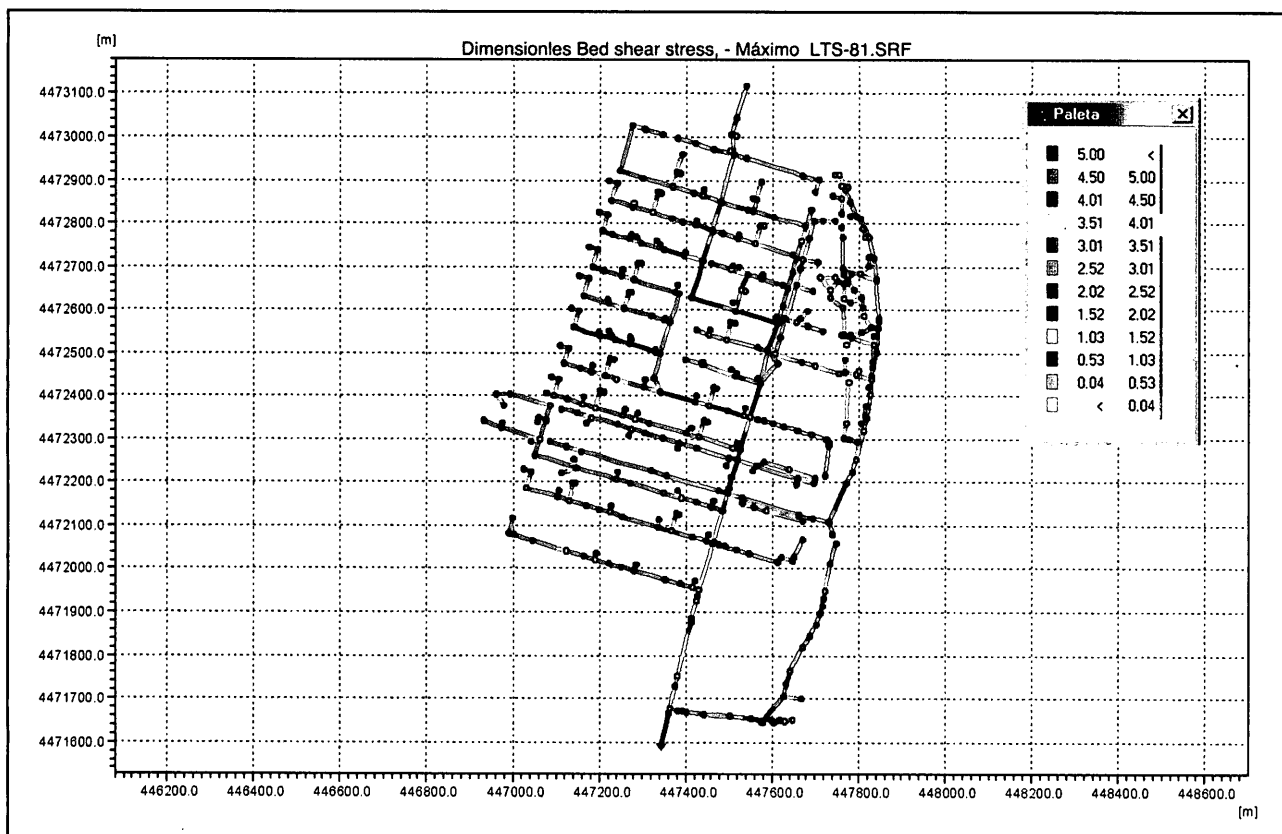


Figura 8. Valores máximos del esfuerzo cortante adimensional para lluvia durante un año lluvioso (1981). Los tramos en los que el sedimento no puede ser movilizado se representan en color gris.

Ciudades llenas de Vida

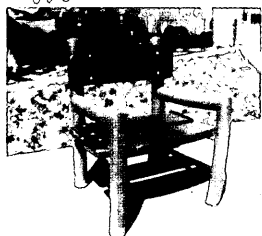
Alcantarillado



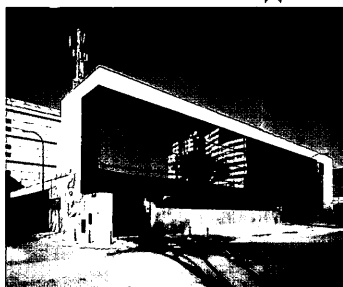
Galerías de Servicio



Mobiliario Urbano



Edificación



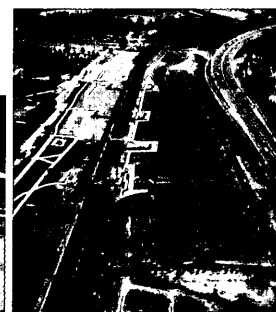
Jardinería



Obra Civil



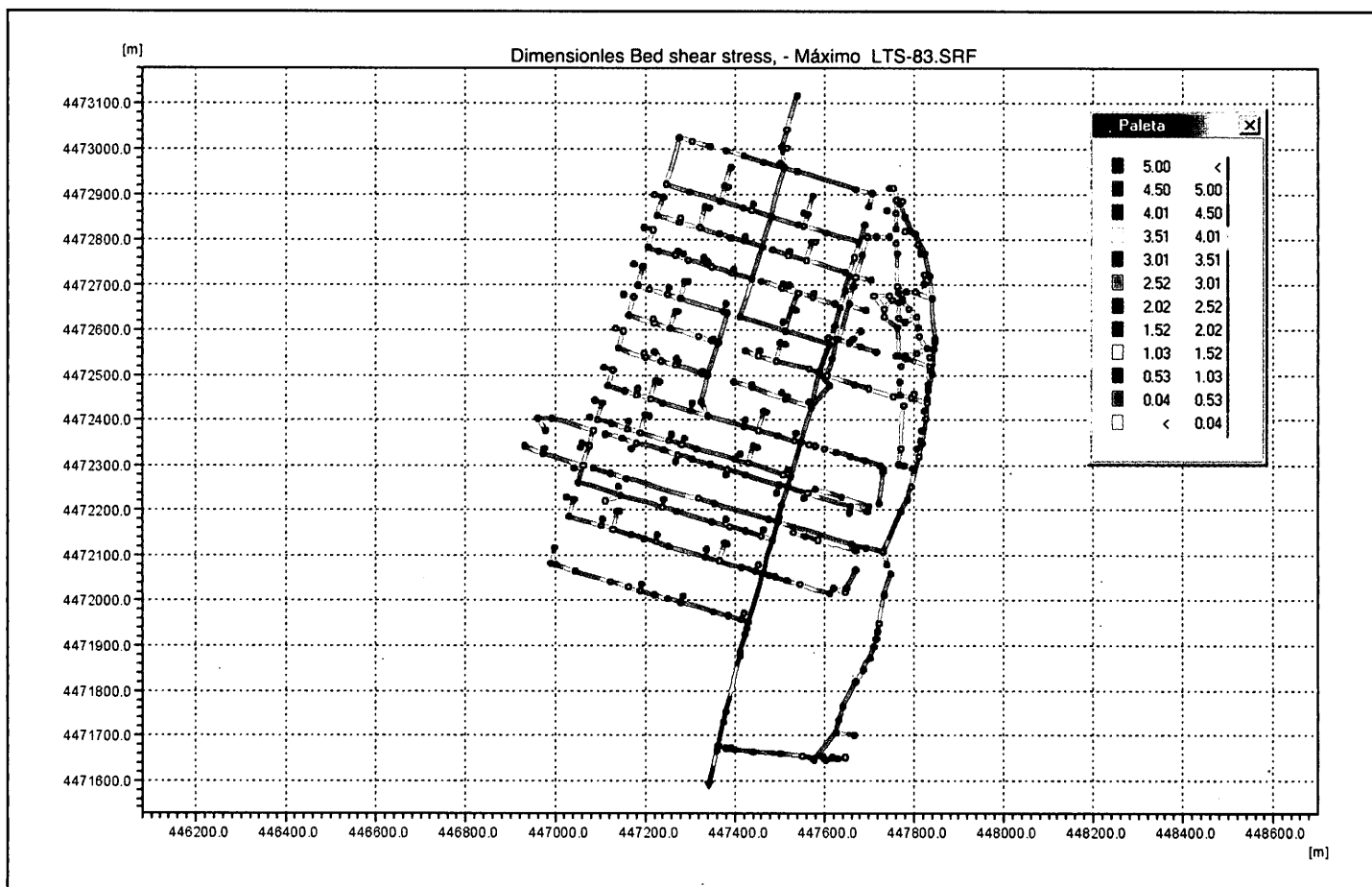
Aparcamientos



**Alcantarillado • Galerías de Servicio • Mobiliario Urbano • Jardinería
Obra Civil • Edificación • Aparcamientos • Medio Ambiente
Mantenimiento Integral de Edificios**



LICUAS, S.A.



Analizando los resultados de la simulación para los distintos tramos de la red, se pueden definir tres grupos de colectores con características similares en cuanto al transporte de sedimentos:

1. Tramos en los que se movilizan sedimentos con cada lluvia, incluso con lluvias pequeñas. Este grupo lo integran en su mayoría los tramos visitables en galería (Figura 1), que recogen el agua de toda la zona y la conducen hacia la unión con el colector principal de la red del Ayuntamiento. La pendiente media es del 8%.
2. Colectores en los que se movilizará el material para un gran número de lluvias, excepto para las de menor entidad. Son mayormente tramos pertenecientes a la zona de viviendas, con diámetros comprendidos entre 300 y 600 mm y pendientes medias del 3%. Los caudales conducidos en época de lluvias proceden de la escorrentía de calles y edificios, así como de las aguas residuales domésticas.
3. Colectores en los que el transporte de sedimentos se realiza sólo en unas pocas ocasiones, para las lluvias más intensas. Este grupo está formado por la ma-

yoría de los tramos de la zona ajardinada, con diámetros desde 300 a 600 mm, predominando el diámetro de 400 mm, y pendientes medias del 3,5%. Los caudales en estos tramos proceden de la escorrentía de las zonas verdes. También se incluyen en este grupo los tramos de la zona de viviendas con poca pendiente o pendiente negativa, así como la mayoría de los tramos en cabecera, en los que el caudal circulante es de poca entidad.

En las Figuras 10 a 12 se muestra el número de veces que se supera el esfuerzo cortante crítico en un tramo tipo de cada grupo, para los seis años simulados. En las figuras aparece representado el valor del cortante adimensional (en negro) junto a la curva de duración acumulada para el mismo (en rojo). Debajo se muestra el número de días a lo largo de toda la simulación en que el valor del cortante crítico es igualado o excedido.

Para cada grupo, el cortante crítico se iguala o supera por término medio en el 100%, 8,35% y 0,005%, respectivamente del tiempo total simulado, lo cual viene a suponer unos 365, 30 y 0,01 días al año, respectivamente, en los que se autolimpiarán los colectores.

Figura 9. Valores máximos del esfuerzo cortante adimensional para lluvia durante un año seco (1983). Los tramos en los que el sedimento no puede ser movilizado se representan en color gris.

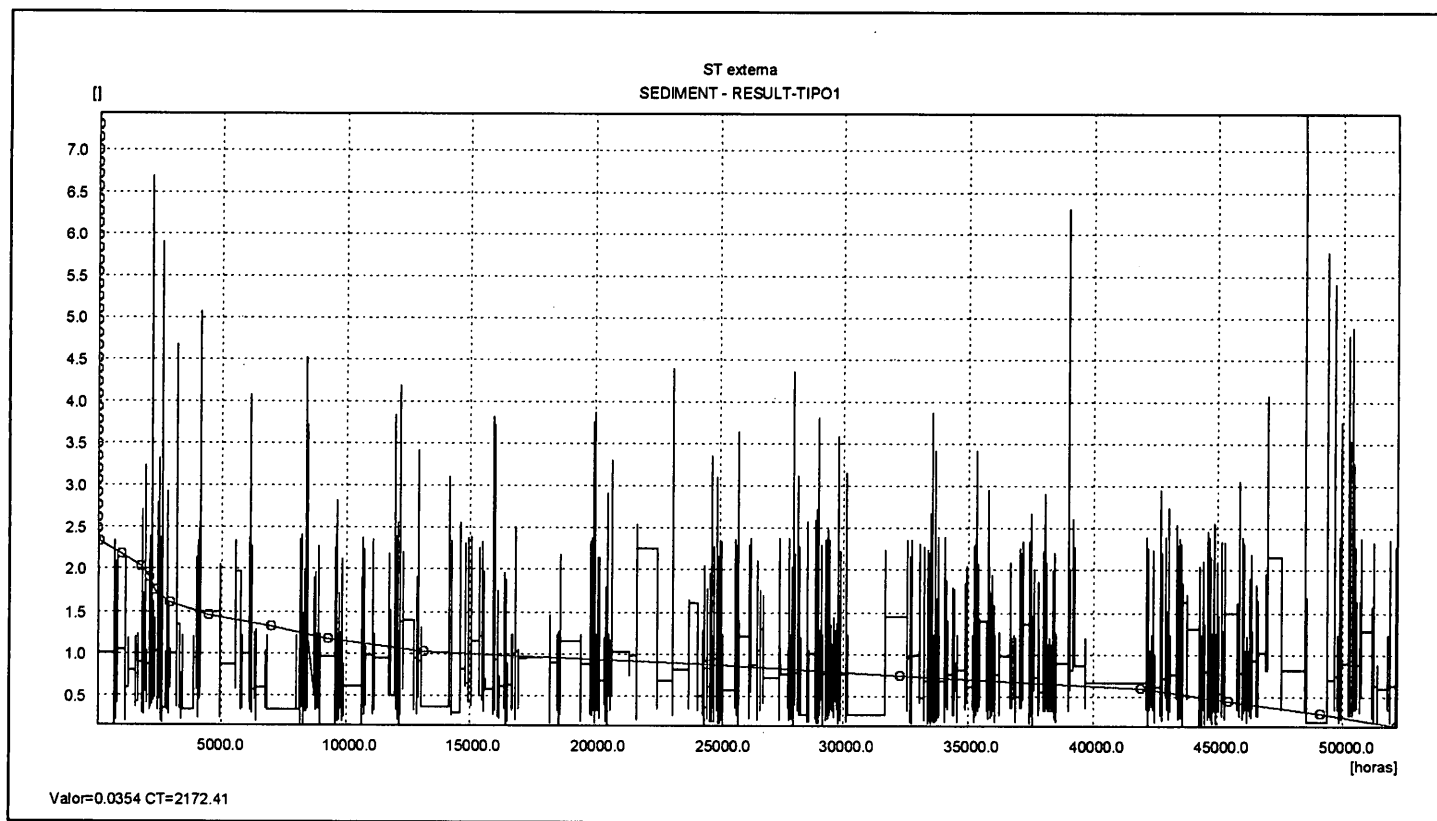


Figura 10. Valor del esfuerzo cortante adimensional (en negro) y curva de duración acumulada (en rojo) en un tramo correspondiente al grupo 1.

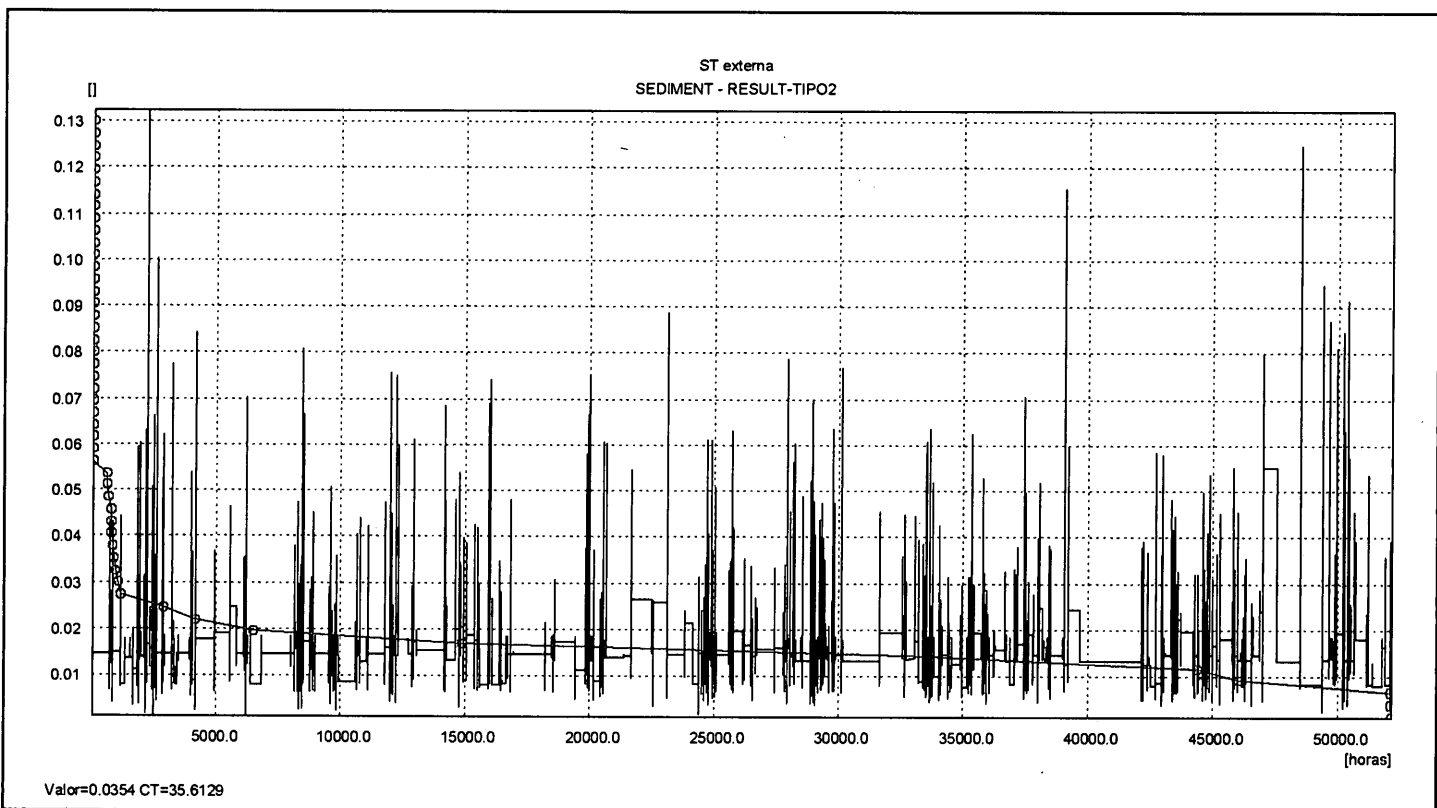
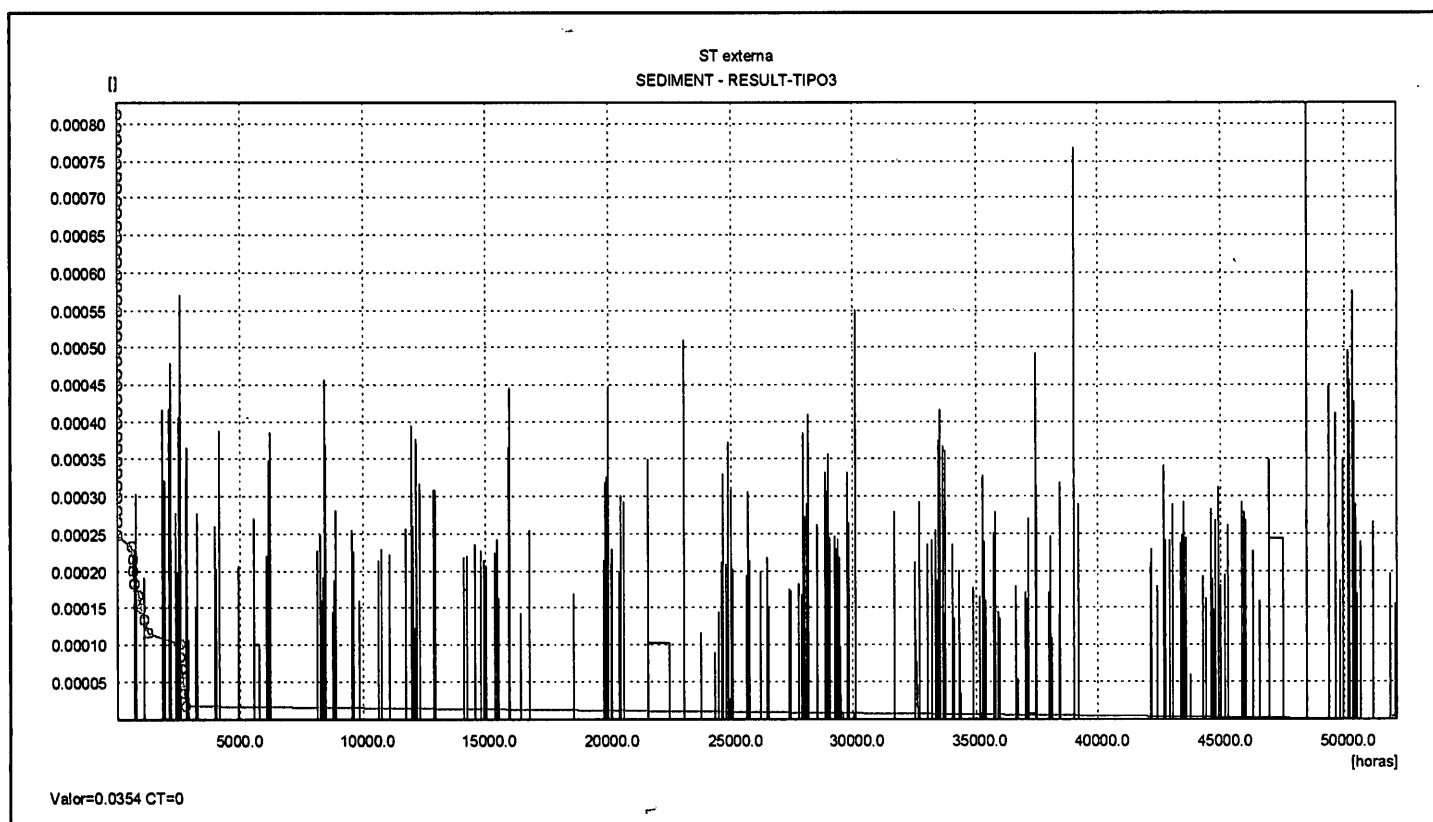


Figura 11. Valor del esfuerzo cortante adimensional (en negro) y curva de duración acumulada (en rojo) en un tramo correspondiente al grupo 2.



En la Tabla 3 se recogen los datos de los tramos de la red clasificados según la frecuencia de movilización de sedimentos.

Esta clasificación queda reflejada en la Figura 13, en la que los grupos se han representado con diferentes colores. Los tramos con frecuencia de movilización de sedimentos alta (grupo 1) aparecen en color azul, los de frecuencia media (grupo 2) en verde y los de frecuencia baja (grupo 3) en color gris.

A la vista de los resultados, podría decirse que aproximadamente el 75% de la red, alrededor 12 Km, no necesitaría limpieza, lo cual supondría un considerable ahorro económico.

Figura 12.
Valor del
esfuerzo
cortante
adimensional
(en negro) y
curva de
duración
acumulada (en
rojo) en un
tramo
correspondient
e al grupo 3.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Se ha definido una metodología válida para el estudio del transporte potencial de sedimentos en una red de saneamiento, consistente en la confección y calibración de un modelo hidrodinámico, sobre el que se ha simulado el transporte potencial de sedimentos.
- Se ha simulado el transporte de sedimentos durante 24 horas en tiempo seco, obteniendo las zonas propensas a la acumulación de sedimentos durante las épocas sin lluvias. Para el estudio del transporte de sedimentos con lluvia se ha realizado una simulación a largo plazo con las lluvias de seis años, analizando la capacidad de transporte potencial de sedimentos de los distintos tramos de la red durante dicho periodo.
- Se han agrupado los tramos de la red en tres grupos, según la frecuencia de movilización potencial de sedimentos. En el primer grupo estarían los tramos que se limpian con cada episodio de lluvia. El segundo grupo estaría formado por colectores que se limpiarían frecuentemente, aunque no con las lluvias más pequeñas en las que las velocidades son demasiado bajas. Por último, el tercer grupo lo formarían mayormente los tra-

TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS TRAMOS DE LA RED DE VALDEBERNARDO SEGUN LA CAPACIDAD DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS

Grupo	1	2	3
Nº tramos	24	279	142
Longitud (m)	1.256,75	10.699,79	4.205,46
% respecto al total	7,78	66,20	26,02



Figura 13 Clasificación de los tramos de la red de Valdebernardo según frecuencia de movilización de sedimentos: frecuencia alta (azul), frecuencia media (verde) y frecuencia baja (gris).

mos que se limpiarían muy pocas veces al año o incluso nunca. Aproximadamente el 75% de la red de Valdebernardo es autolimpiante.

- La metodología desarrollada puede ser aplicada para conseguir una planificación más racional y eficiente de las tareas de conservación y limpieza de la red, lo cual repercutirá positivamente en la administración de los recursos económicos por parte de los gestores de estos sistemas.

- Los resultados de este estudio indican el transporte potencial de sedimentos, no el transporte real. Dicho transporte real depende de las aportaciones de sedimentos por parte de las cuencas y las aguas residuales. Sin embargo, los resultados obtenidos deben tomarse como una buena estimación de los lugares donde tendrán lugar los depósitos de sedimentos con mayor probabilidad cuando se produzca la entrada de material sólido en la red de alcantarillado. ■

REFERENCIAS

- (1) Lindberg, S. y Jørgensen, T.W., 1986. *Modelling of Urban Storm Sewer Systems*. Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data. Dubrovnik, Yugoslavia.
- (2) Mark. O., Appelgren, C. y Larsen, T, 1995. *Principles and Approaches for Numerical Modelling of Sediment Transport in Sewers*. Water Science and Technology, Vol. 31, No. 7, pp. 107-115.
- (3) Mark. O., 1992. *A Sediment Transport Model for Sewers*. Water Science and Technology, Vol. 25, No. 8, pp. 141-149.
- (4) Engelund, F. y Hansen, E., 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- (5) DHI Water & Environment, 2000. *MOUSE TRAP, Technical Reference on Sediment Transport Module*.