

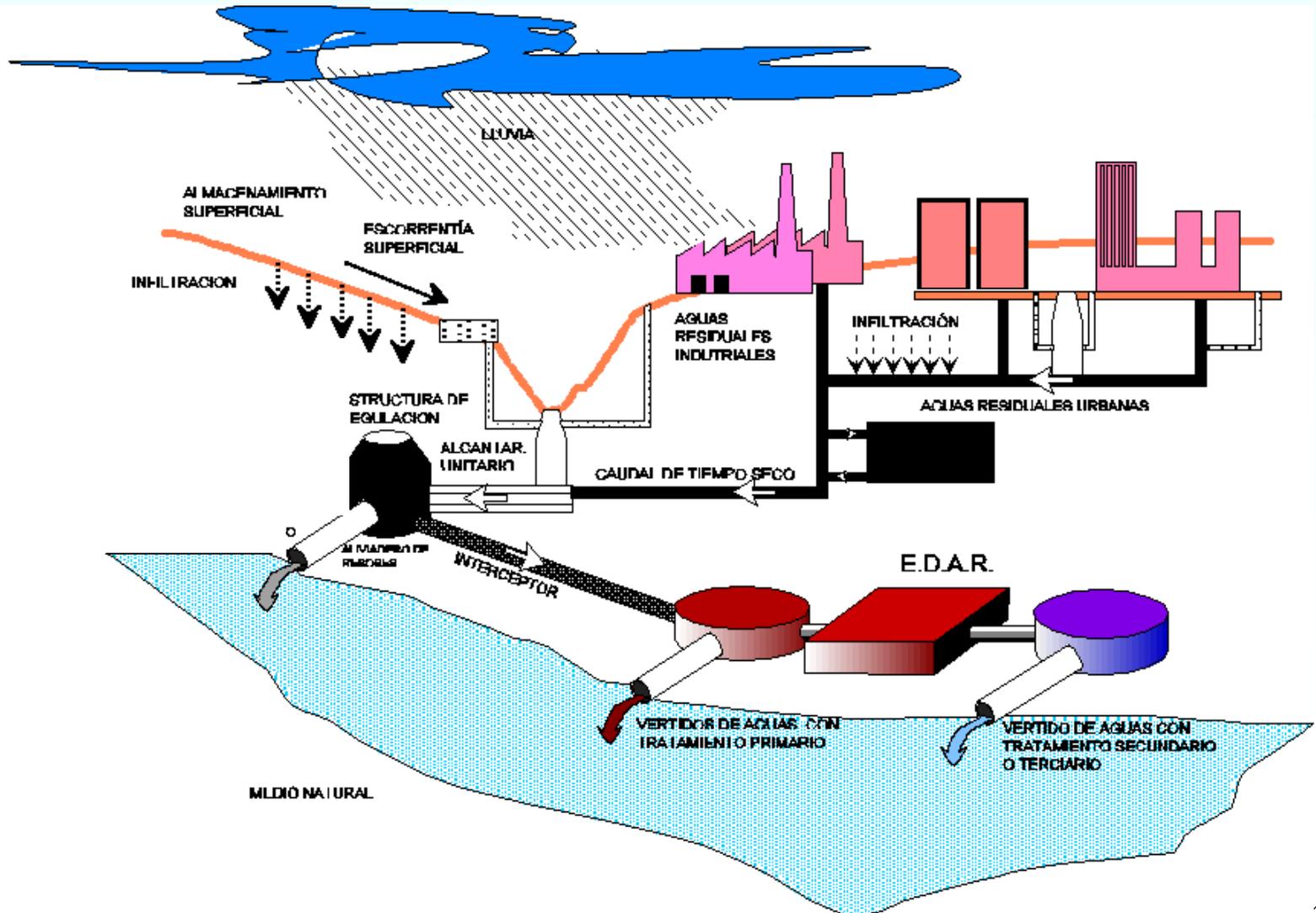
CONTAMINACIÓN EN REDES DE ALCANTARILLADO: TIEMPO SECO Y TIEMPO DE LLUVIA



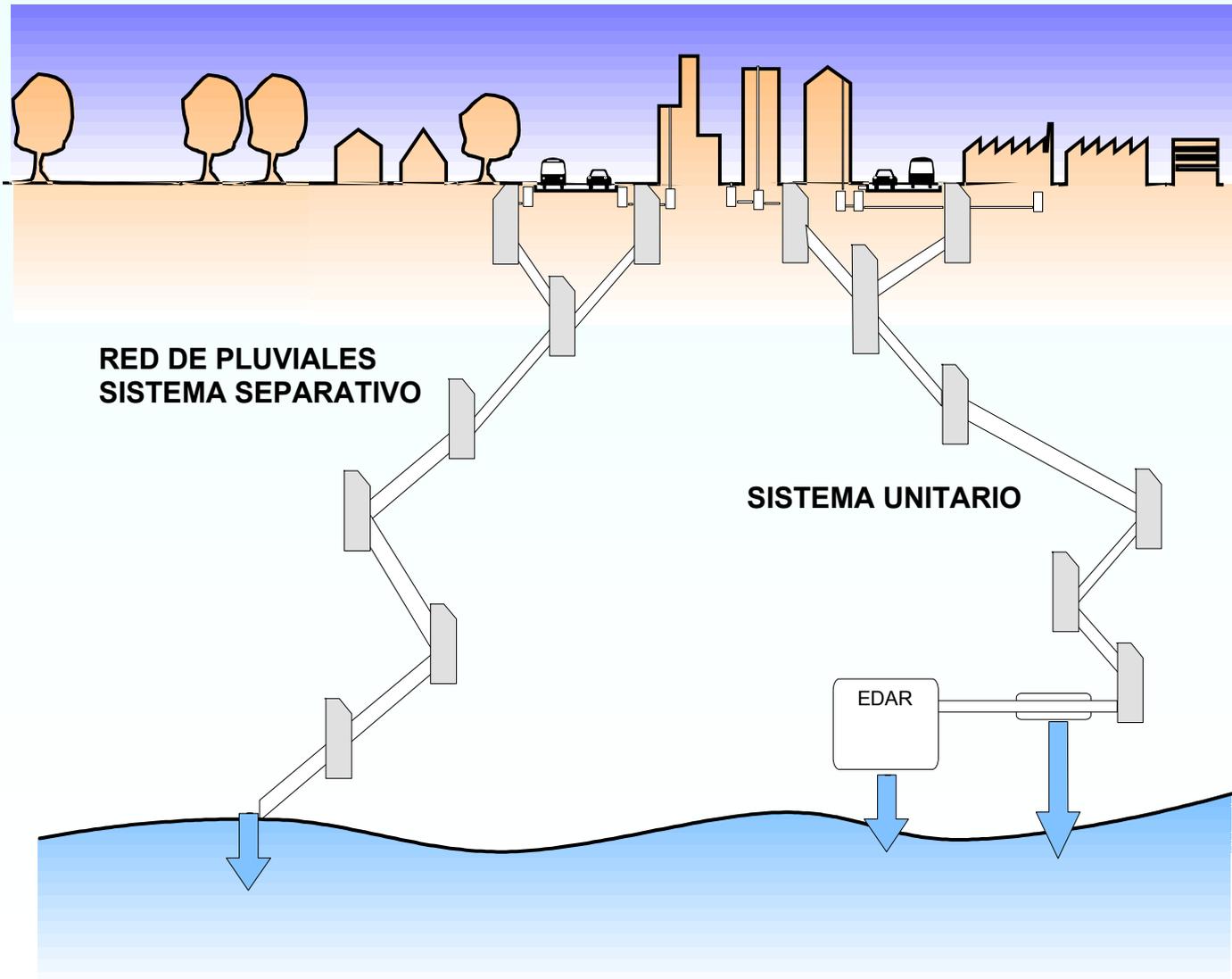
**Grupo de Enxeñaría
da Auga e do
Medio Ambiente**

NOVIEMBRE 2007

SISTEMAS DE SANEAMIENTO



SISTEMAS DE SANEAMIENTO



NUEVA CONCEPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO

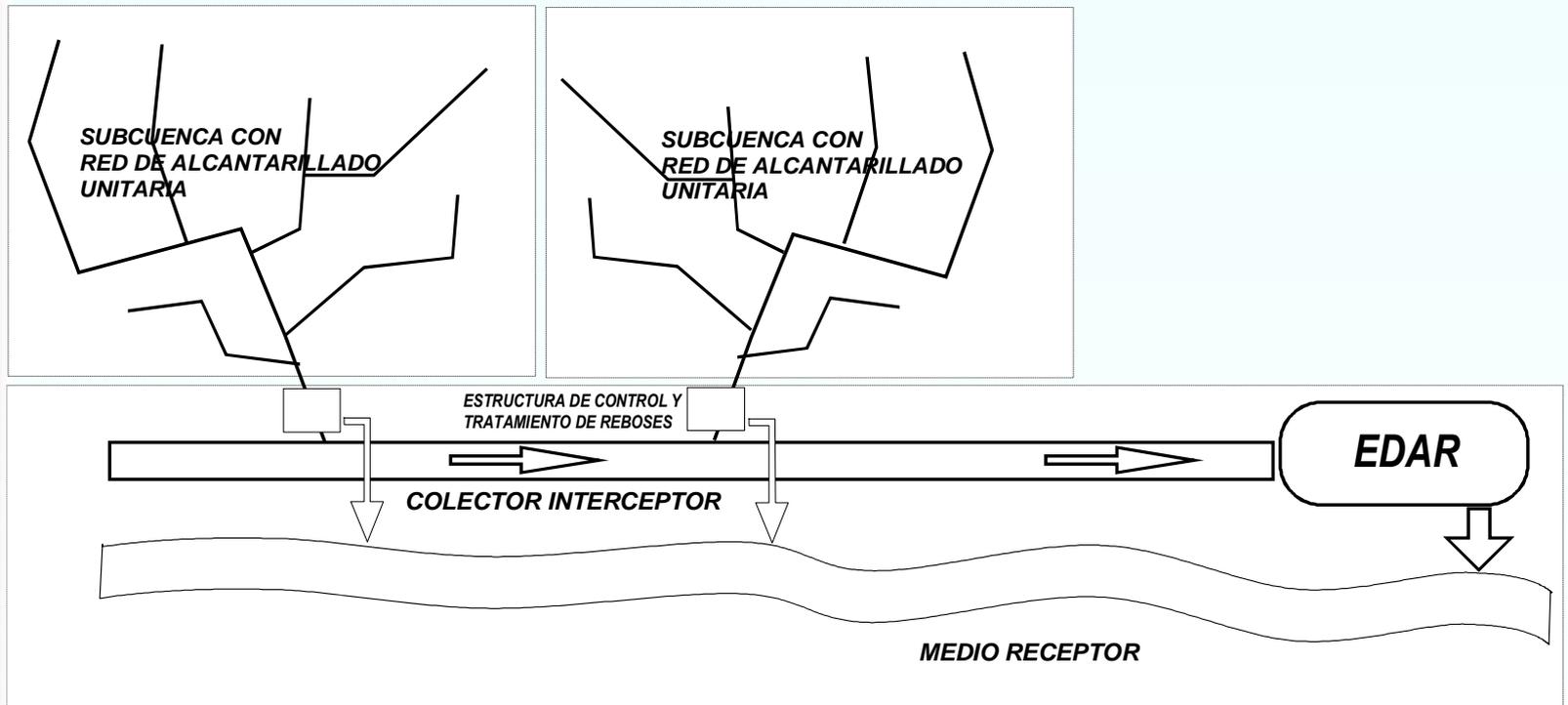
- Los nuevos diseños en ingeniería del saneamiento urbano están motivados por el **nuevo conjunto de objetivos con respecto a la calidad de los sistemas acuáticos.**
 - **Directiva Marco del Agua**
 - Necesidad de controlar vertidos en tiempo de lluvia en normativas nacionales. Primera referencia a vertidos de **“redes separativas de pluviales”** y **“vertidos desde aliviaderos”** en **Orden 1873/2004**, de 2 de junio, (modelos oficiales para la declaración y caracterización de vertidos y desarrollo de la autorización de vertido y liquidación del canon de control vertido).
 - **UNE-EN 752** establece directrices para la gestión de las aguas en tiempo de lluvia en alcantarillados unitarios

NUEVA CONCEPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO

- Referencias a la gestión del saneamiento en tiempo de lluvia en la DIRECTIVA 91/271:
 - *“Los sistemas colectores deberán tener en cuenta los requisitos para el tratamiento de aguas residuales...El diseño deberá hacerse de acuerdo con los mejores conocimientos técnicos... en particular en lo que respecta a...la **restricción de la contaminación de las aguas receptoras por el desbordamiento de las aguas de tormenta...**”*
 - *“Los Estados miembros decidirán medidas para limitar la **contaminación por desbordamiento...podrían basarse en coeficientes de dilución, capacidad en relación con el caudal en época seca, o podrán especificar un determinado número aceptable de desbordamientos al año**”.*

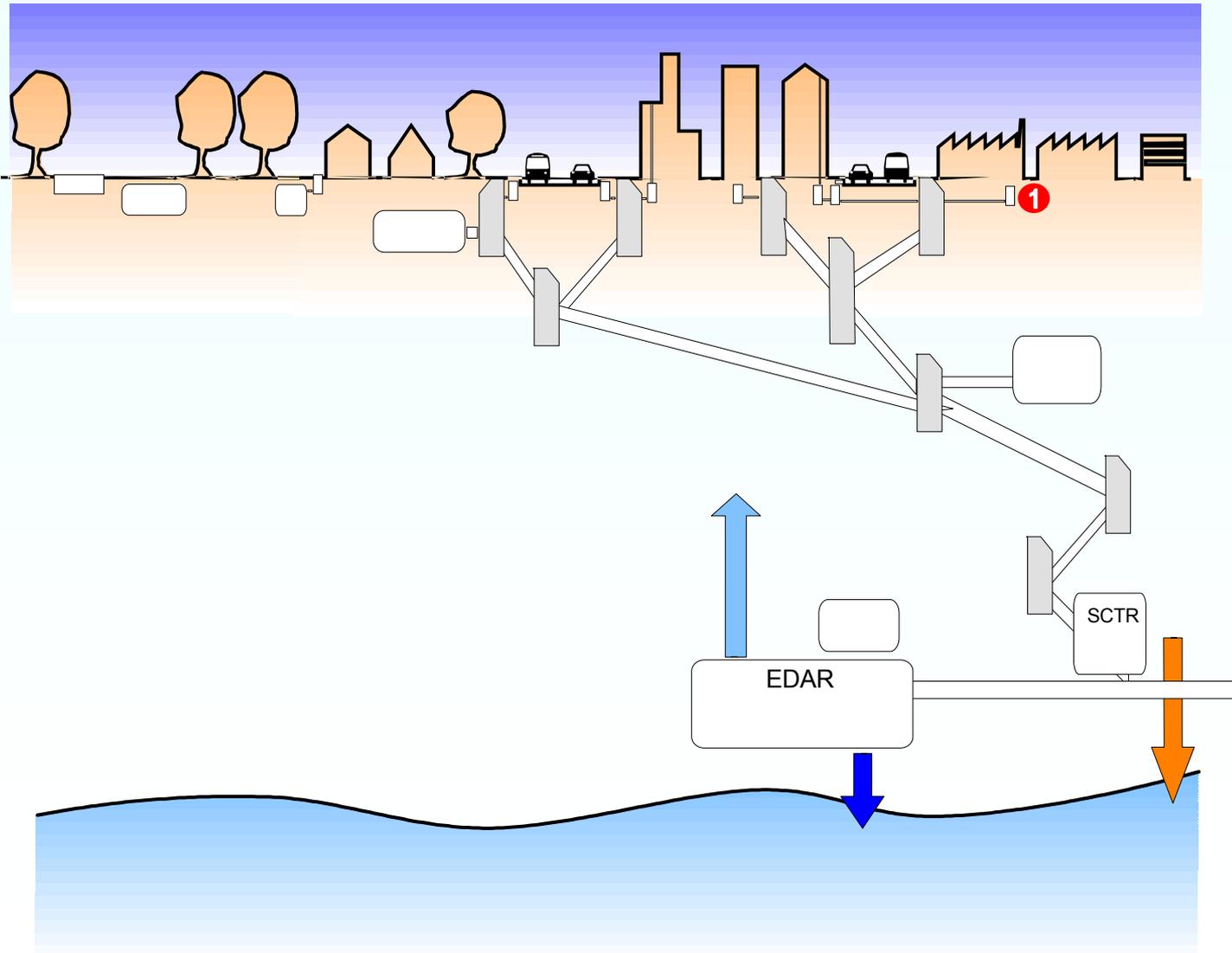
SISTEMAS DE SANEAMIENTO

Dimensionamiento hidráulico



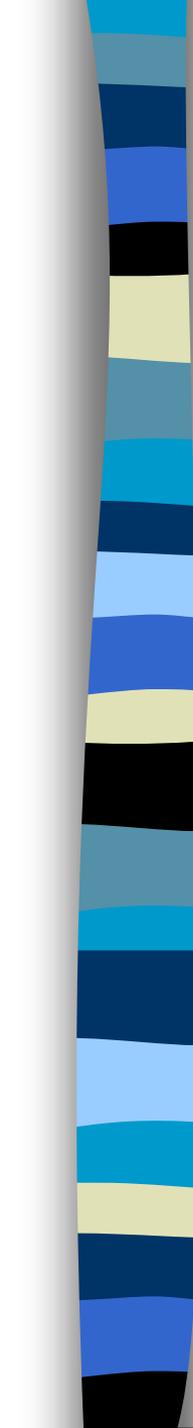
Dimensionamiento ambiental

SISTEMAS DE SANEAMIENTO

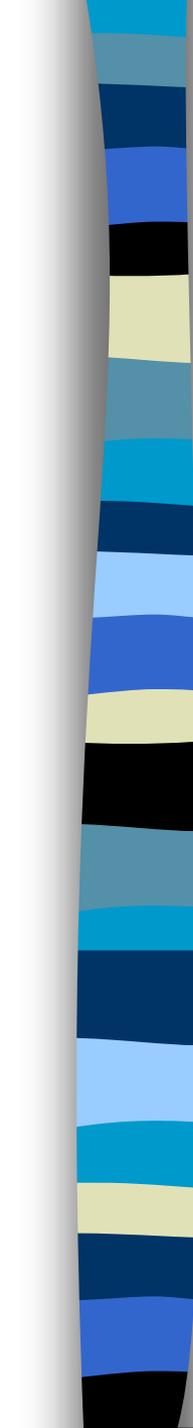


NUEVA CONCEPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO

- Soluciones efectivas requieren una **aproximación integrada** que considere la interrelación y dependencia entre todos los elementos del sistema de saneamiento (cuenca, red de alcantarillado, EDAR, sistema acuático receptor,...)
- La tradición histórica de diseño de sistemas de saneamiento ha cambiando, con más intensidad en los últimos 15 años y alguna de las **antiguas prácticas ya no son aceptadas por la sociedad.**
- **ES IMPORTANTE CONOCER CÓMO SE MOVILIZA LA CONTAMINACIÓN**



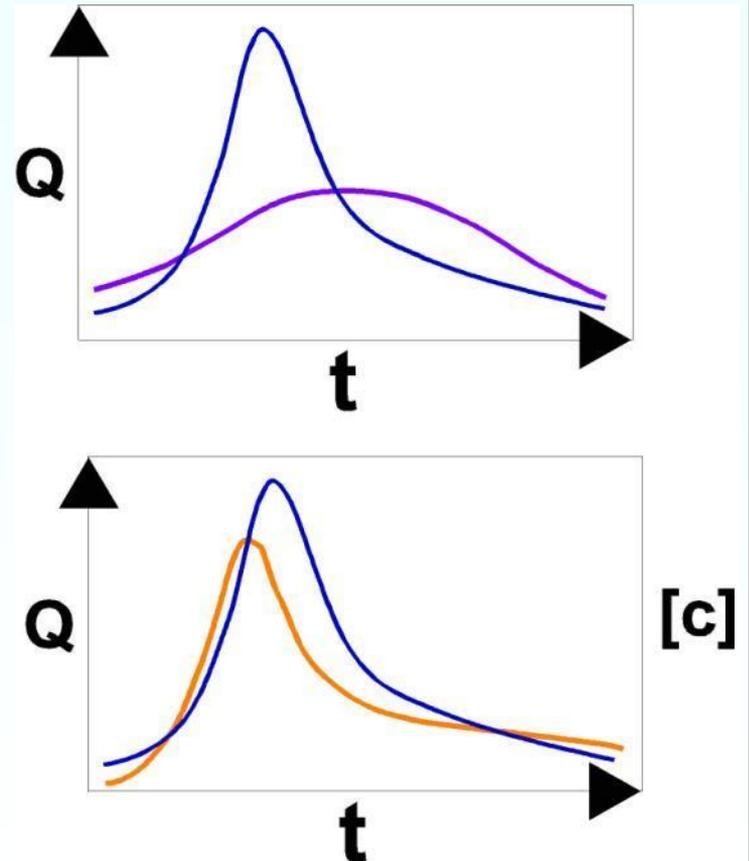
LA MODIFICACIÓN DE LA CUENCA



LA MODIFICACIÓN DE LA CUENCA

LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

- Fue en EE.UU. donde por primera vez se reconoció la importancia de este problema en la “Federal Water Control Act Amendments” de 1972.
- NURP (“Nationwide Urban Runoff Program”) (1983), “Final Report of the Nationwide Urban Runoff Program”



LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

- **En Europa diversos estudios:**
 - **Francia** cinco cuencas piloto en la “Campaña Nacional de Medidas” en 1980-1982 (redes separativas)
 - En **Reino Unido** el “Water Research Center”, dentro del programa de “Gestión de la Contaminación Urbana” estudió cinco cuencas piloto (3 unitarias, 2 separativas) en 1988-1989
 - **Alemania** desarrollo de normativas ATV-A128, ATV-A117.
 - En **España** diversos estudios aislados: UPM, Universidad de Cantabria, Universidade da Coruña, Politécnica de Cataluña, CLABSA, Confederación Hidrográfica del Norte
 - **Grupo GADU de la AEAS**

LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

Focos de contaminación de la escorrentía urbana:

- Contaminación atmosférica
- Contaminación de la superficie de la cuenca
 - Residuos animales
 - Basura y residuos
 - Tráfico rodado
 - Desgaste de fachadas y la corrosión de cubiertas y tejados.
 - Erosión de los pavimentos
 - Posibles actividades agrícolas y de jardinería (fertilizantes, pesticidas y herbicidas)
 - Uso de sal para el deshielo de la nieve
 - Superficies no protegidas (solares)
 - Terrenos con obras

LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

motor

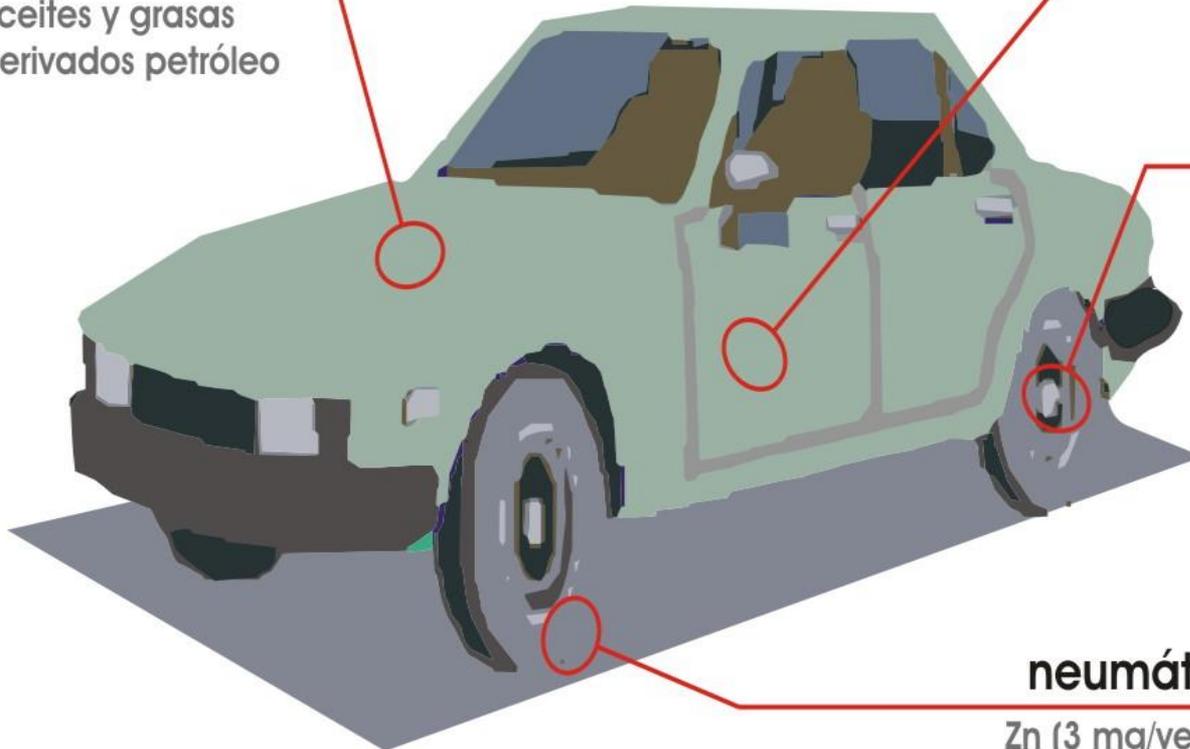
Zn, Cr, Cu, Mn
Aceites y grasas
Derivados petróleo

Chasis

Zn, Cr, Fe, Al

frenos

Cd, Pb



neumáticos

Zn (3 mg/veh·Km)
Cd (0.02 mg/veh·Km)
S.S. ($D < 20\mu\text{m}$, $\rho = 1.6$)

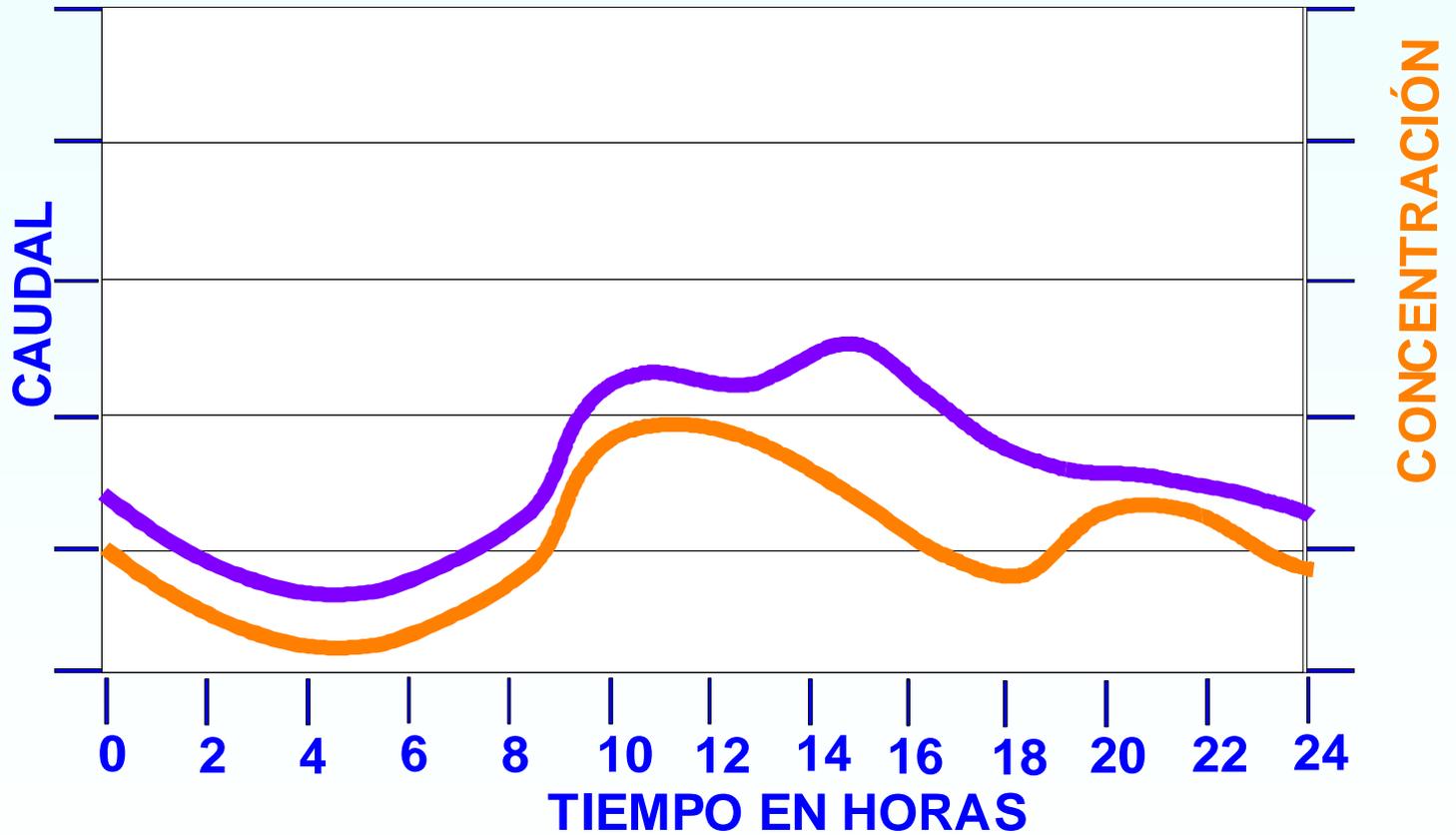


LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

CMS de la cuenca separativa de Fontiñas - SdC

	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	SDT (mg/l)	SDV (mg/l)	ST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	COT (mg/l)
<i>C090299</i>	96	---	192	---	288	---	---	6
<i>C250399</i>	190	---	105	---	295	79	---	9
<i>C040599</i>	324	---	211	---	535	---	---	22
<i>C270699</i>	385	---	81	---	465	---	---	5
<i>C050899</i>	590	---	131	---	721	---	---	10
<i>C191299</i>	64	---	89	---	153	---	---	5
<i>C010200</i>	219	---	93	---	312	---	---	7
<i>C100200</i>	50	---	70	---	120	---	---	3
<i>A170403</i>	50	11	72	25	122	25	---	---
<i>A260703</i>	264	84	196	67	459	140	49	---
<i>A250803</i>	278	100	164	47	442	180	94	---
<i>A280803</i>	117	29	93	29	205	54	0	---
<i>A080903</i>	212	51	96	36	308	88	34	---
<i>A300903</i>	230	51	223	86	453	58	21	---
Valor medio	219	54	130	48	348	89	40	8
<i>Desviación estándar</i>	149.23	33.44	55.42	23.94	173.48	53.59	35.33	6.00

AGUA RESIDUAL EN TIEMPO SECO



DB05 = 250 mg/L

DQ0 = 500 mg/L

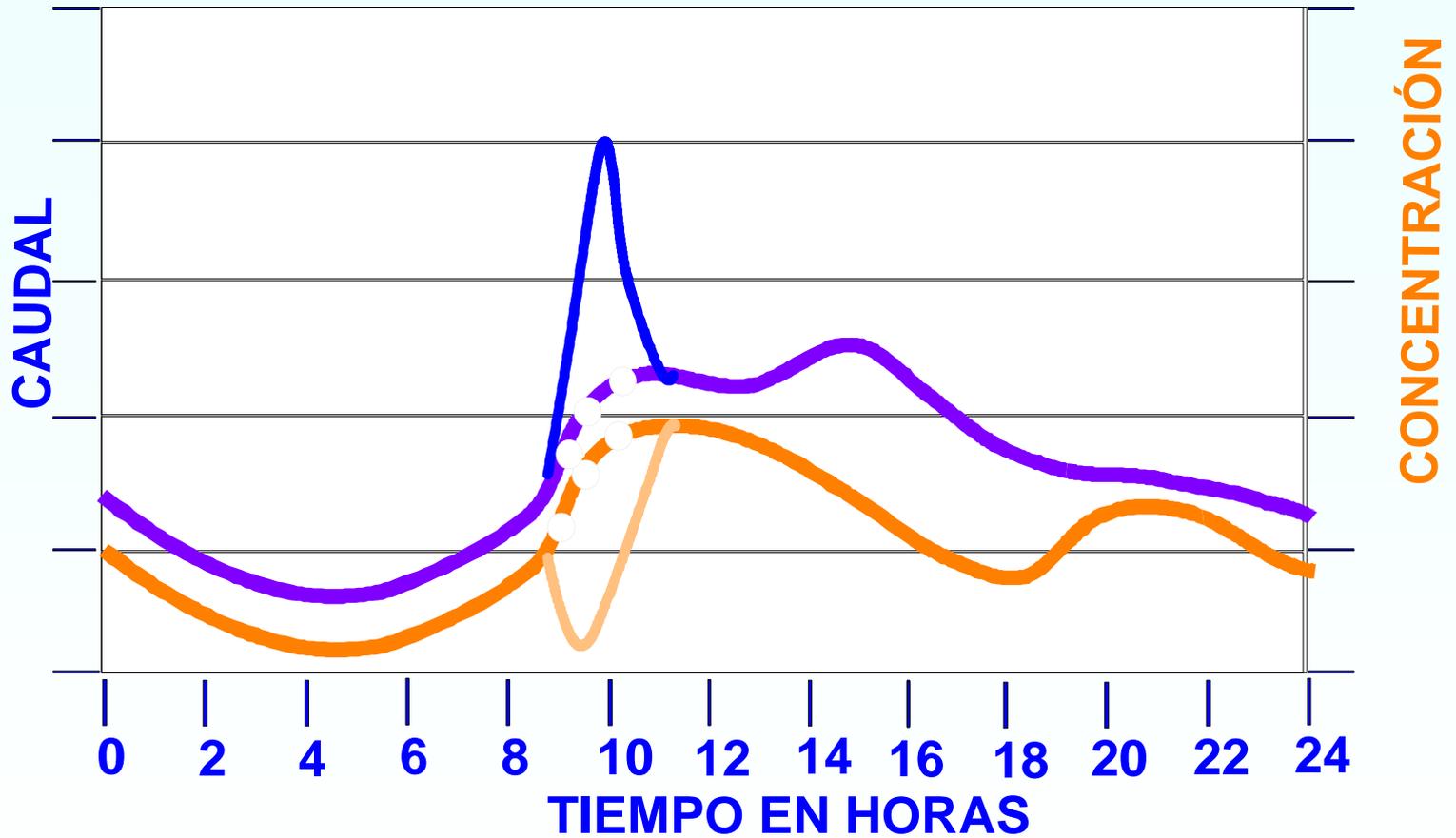
SS = 250 mg/L

LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

Resultados de contaminación de la escorrentía superficial urbana (NURP-EPA, 1983).

Contaminante (mg/L)	Tipo de zona			
	Residencial	Mixto	Comercial	Abierta. No urbana.
DBO₅	10	7	9	-
DQO	73	65	57	40
SST	101	67	69	70
Pb	0.144	0.114	0.104	0.030
Cu	0.033	0.027	0.029	-
Zn	0.135	0.154	0.226	0.195
NTK	1.900	1.290	1.180	0.965
NO₂⁻+NO₃⁻	0.736	0.558	0.572	0.543
P-Total	0.383	0.263	0.201	0.121

AGUA RESIDUAL EN TIEMPO SECO



DBO5 = 250 mg/L

DQO = 500 mg/L

SS = 250 mg/L

PROGRAMA NACIONAL DE MEDICIÓN DE DESCARGAS DE SISTEMAS UNITARIOS (PROMEDSU)

■ ANTECEDENTES:



- **Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (Secretaría de Estado de Agua y Costas, Ministerio de Medio Ambiente) organismo promotor y director del estudio.**



- **Desarrollado por Infraestructura y Ecología S.L., con la asistencia técnica de la Universidade da Coruña.**



- **Con la colaboración de los Ayuntamientos de las diferentes ciudades.**



- **Supervisión del Grupo Avanzado de Drenaje Urbano (GADU) de la AEAS.**
- **Duración dos años 2000-2001**

■ CUENCAS ANALIZADAS:

VITORIA: C/ Domingo Beltrán
Análisis de una cuenca urbana, su aliviadero e influencia aguas arriba y abajo del río Zadorra

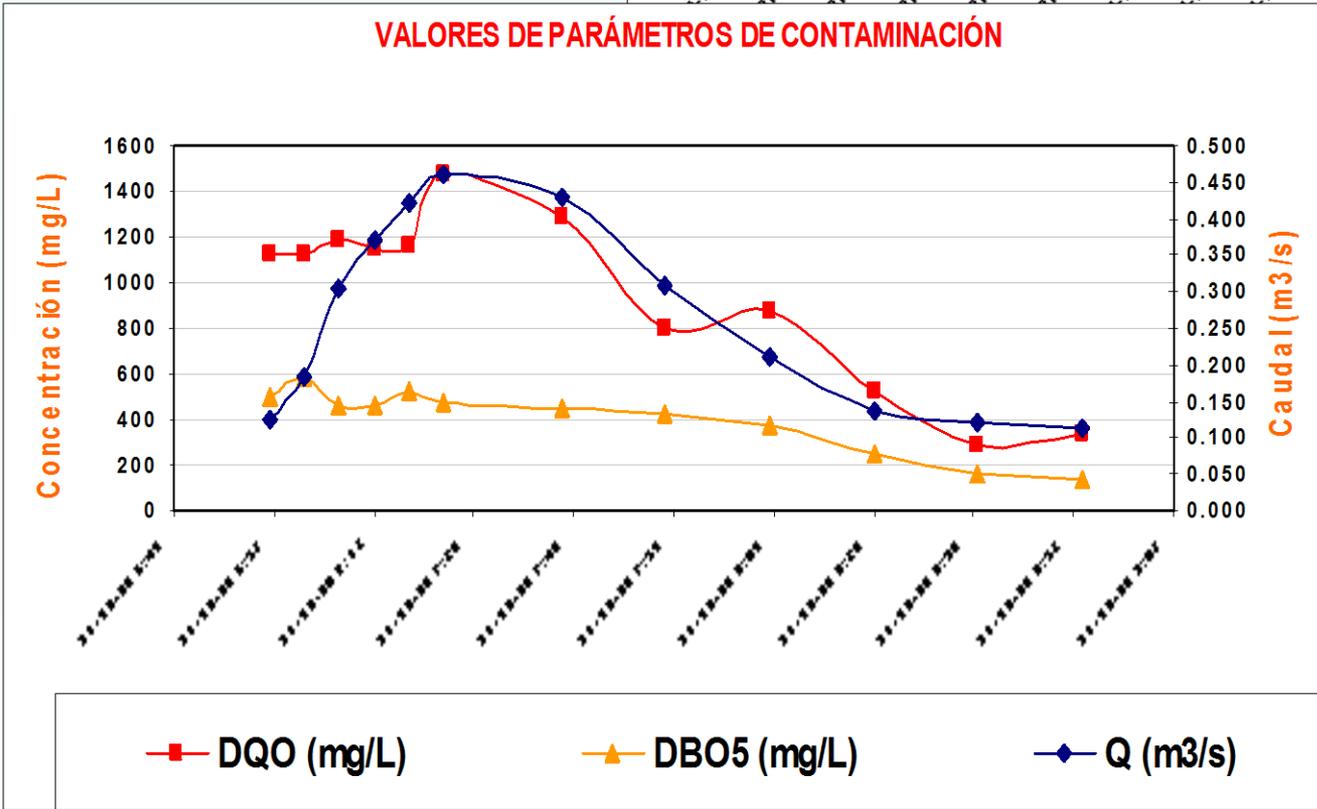
BARCELONA: Cuenca de Bac de Roda
Análisis de desbordes vertidos al mar próximos a playa. Se incluye contaminación bacteriológica

MADRID: Aliviadero de Fuentelarreina (Arroyofresno)
Análisis de una gran cuenca urbana con desbordes vertidos al río Manzanares

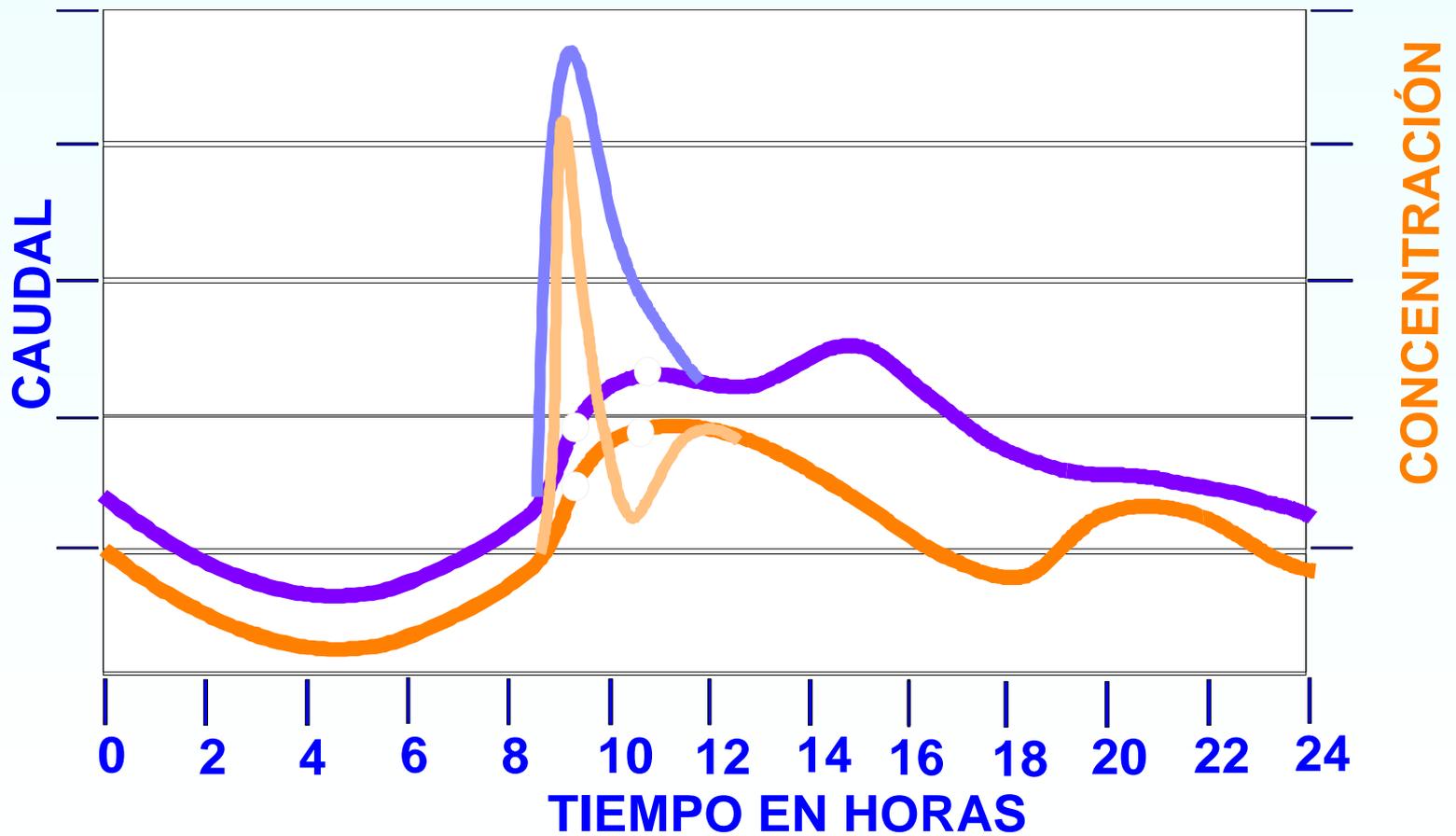
VALENCIA. Estación de bombeo de Malvarrosa
Idéntico a Barcelona

SEVILLA: Cuenca de Triana – Los Remedios
Análisis de una cuenca interior puramente urbana sin industria

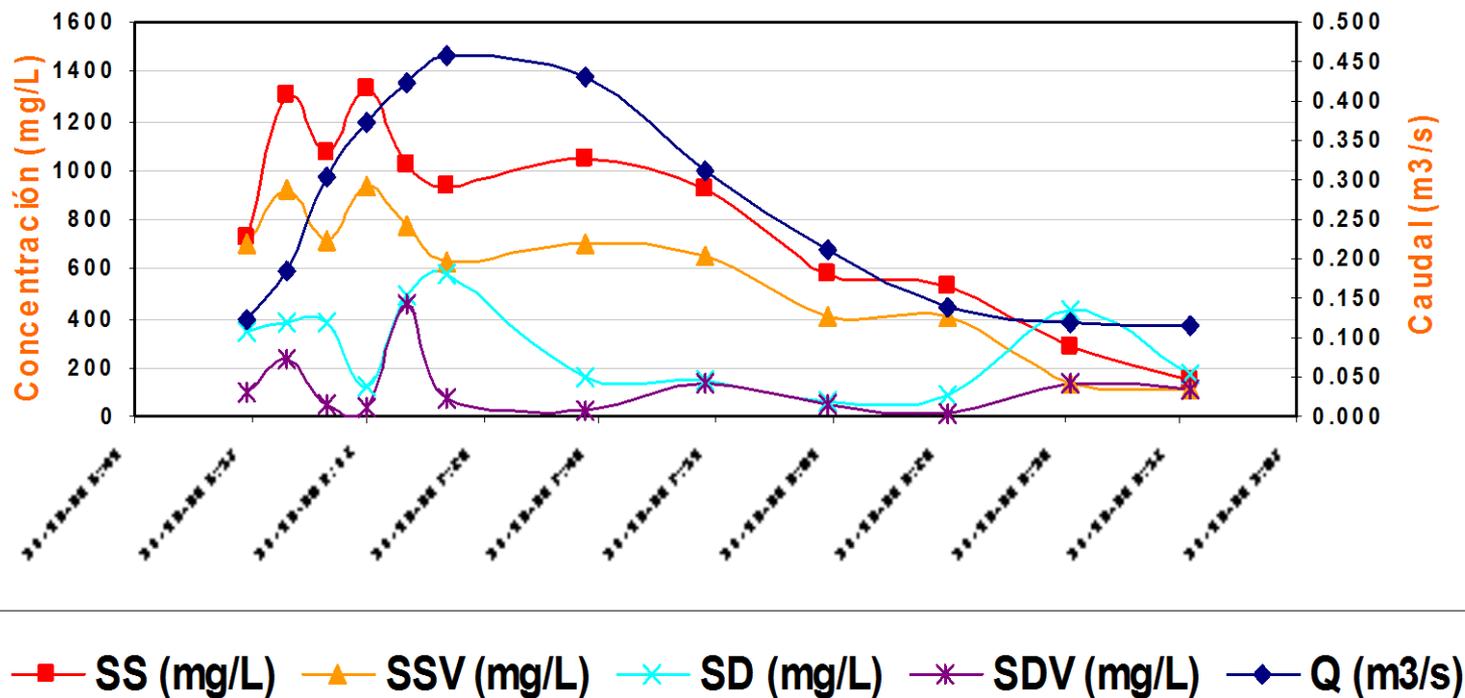
SUCESO SEVILLA-03

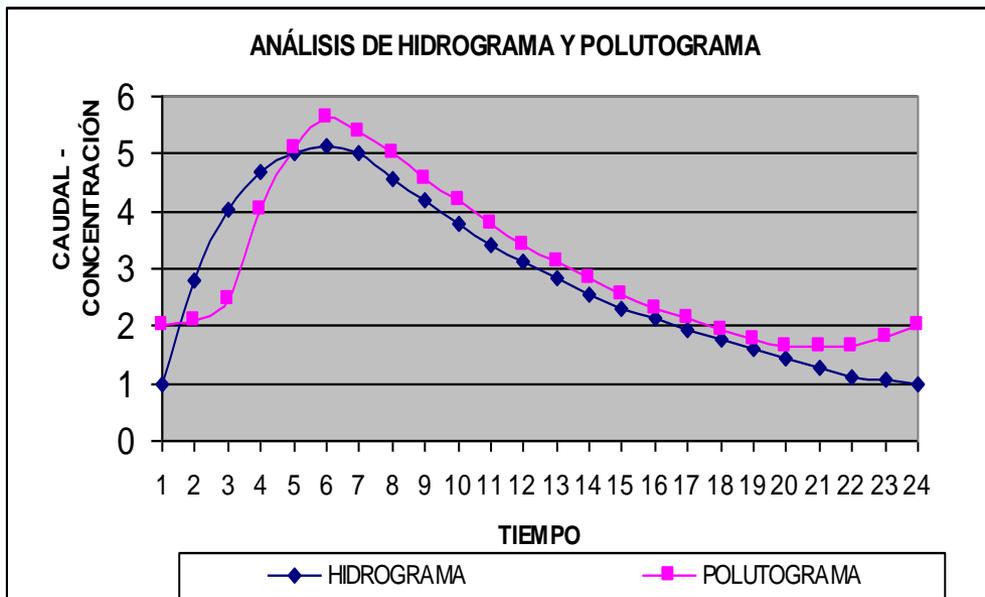
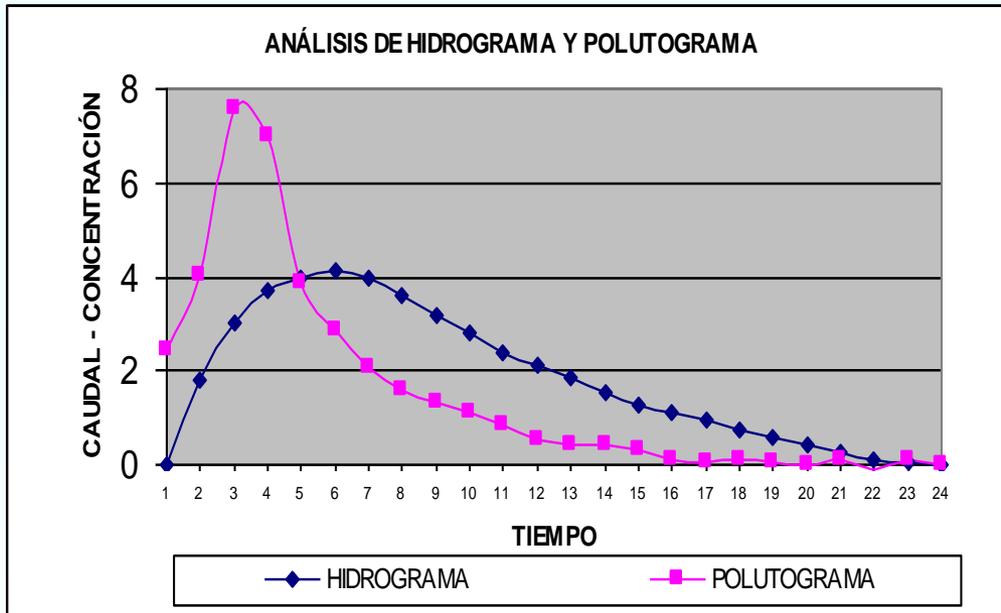


CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA

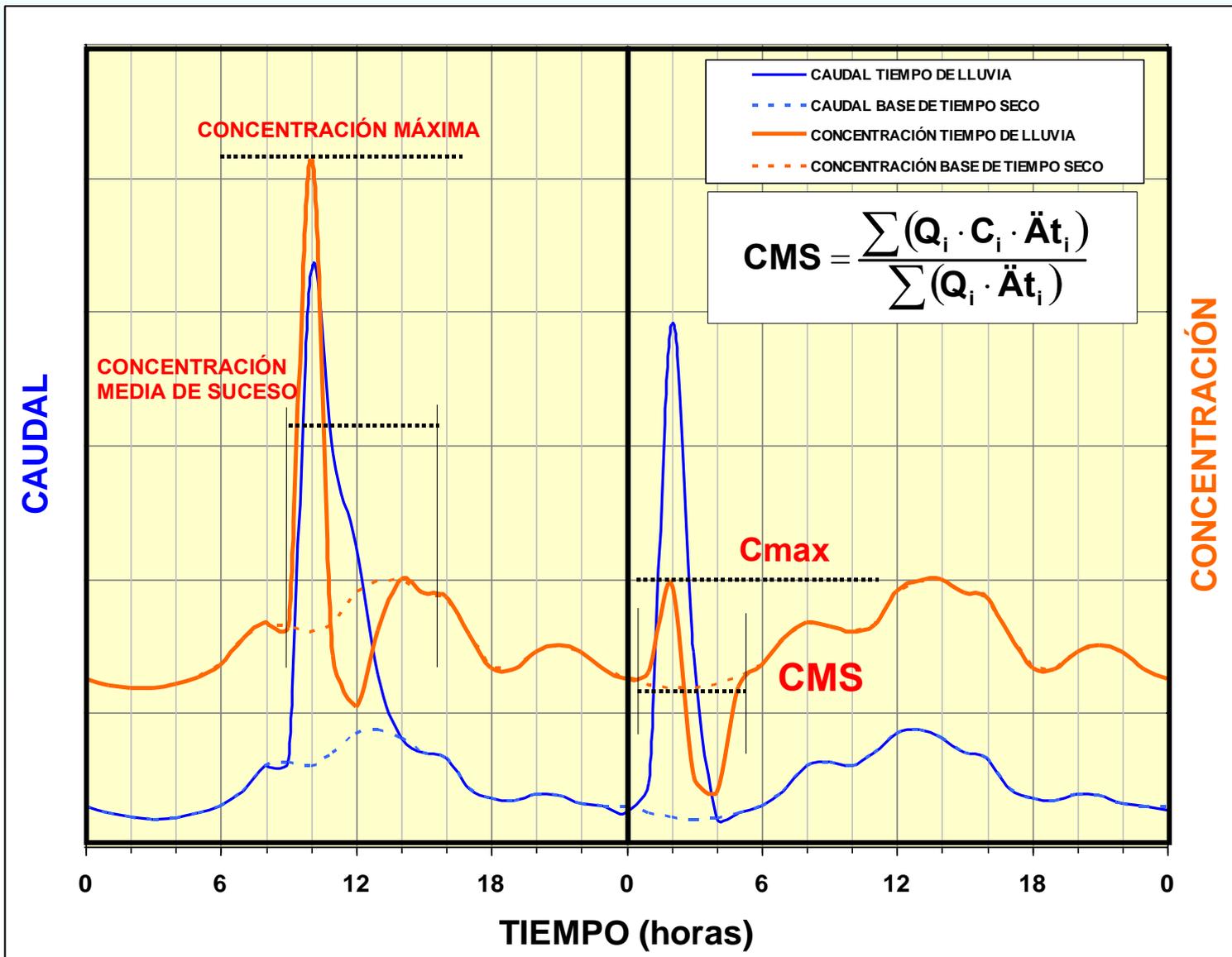


VALORES DE PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN





CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA



PARÁMETROS EN INTERVALO DE MUESTREO

CAUDALES (m³/s)

MÍNIMO	0.114
MÁXIMO	0.496
MEDIO	0.279
COEF. PUNTA (Q _{max} /Q _{min})	4.359

VOLÚMENES (m³)

TOTAL DEL SUCESO	1749.7
ASIGNADO A TIEMPO SECO	676.1
ASIGNADO A ESCORRENTÍA	1073.5
% ESCORRENTÍA/ TOTAL	0.6

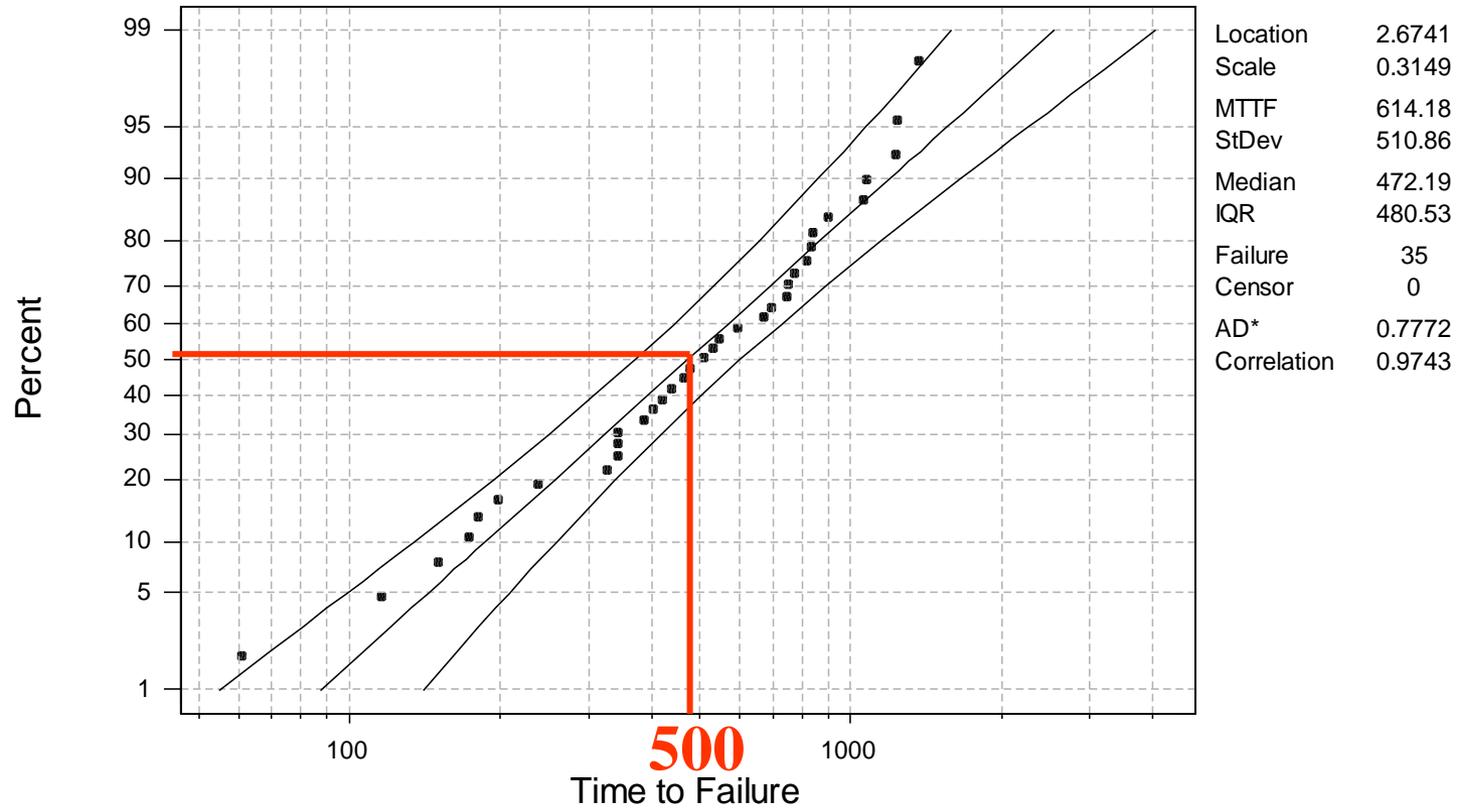
CONCENTRACIONES

	[] MAX	[] MIN	[] MED	CMS
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l
DQO	1472.0	286.0		977.0
DBO5	592.5	138.0		401.5
COT	102.5	19.4		57.7
NTK	94.2	36.9		54.5
NH ₄ ⁺	37.9	15.4		23.0
P-total	8.9	8.9		8.9
SS	1335.3	153.0		851.4
SSV	929.4	111.0		594.0
SD	580.0	60.0		237.0
SDV	450.0	16.0		103.3
ST	1689.1	323.0		1088.4
Turbidez	344.0	61.5	228.5	----
Cond.	0.7	0.4	0.5	----
Temp	22.9	19.0	20.7	----
pH	8.6	6.9	7.5	----
Cu (dis)	0.017	0.017		0.017
Zn (dis)	0.034	0.034		0.034
Pb (dis)	0.660	0.660		0.660
HC (dis)	7.400	2.130		5.177

CONTAMINACIÓN PROMEDSU

Probability Plot for SS-CMS

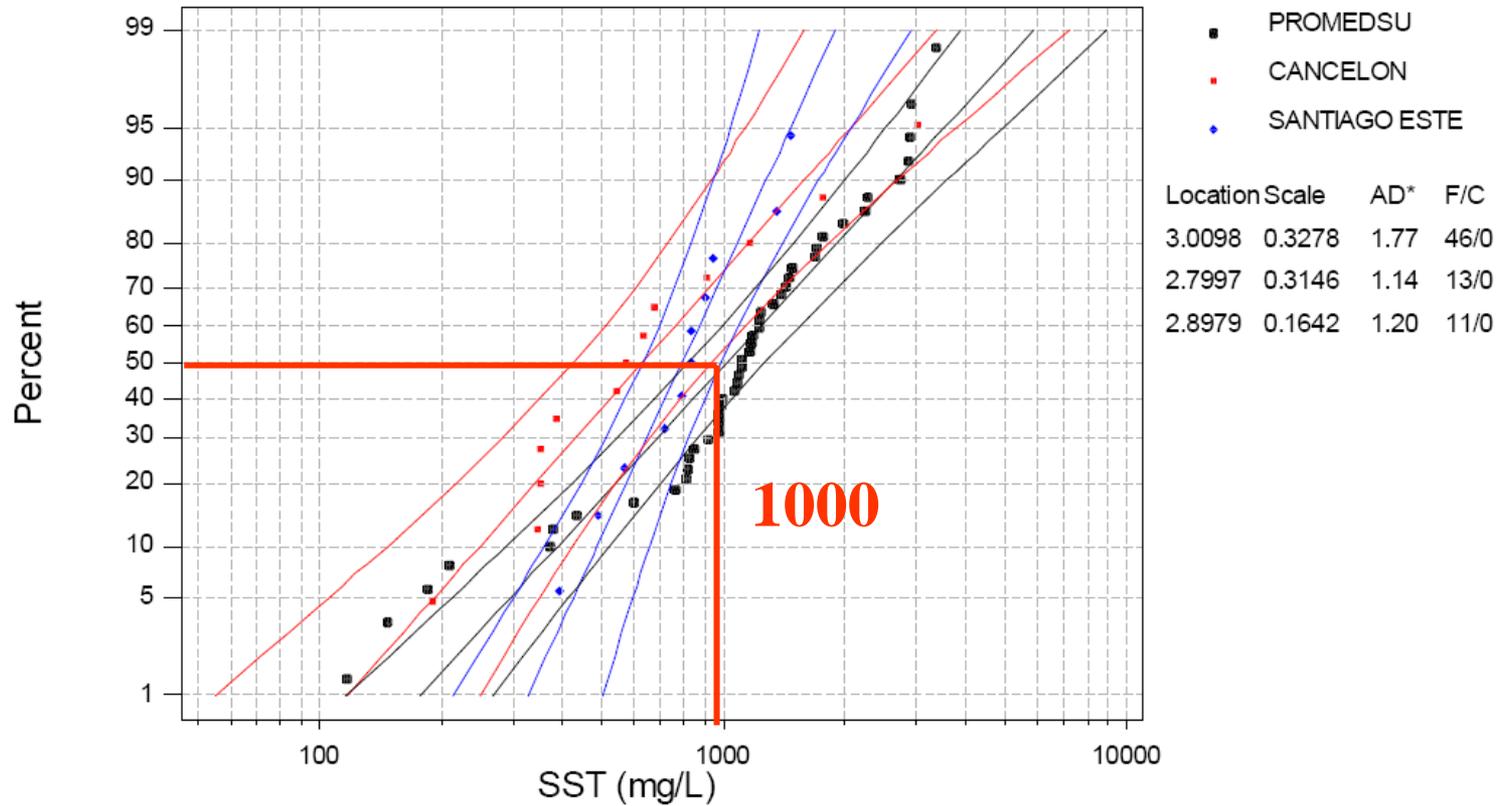
Lognormal base 10 Distribution - LSXY Estimates - 95.0% CI
Complete Data



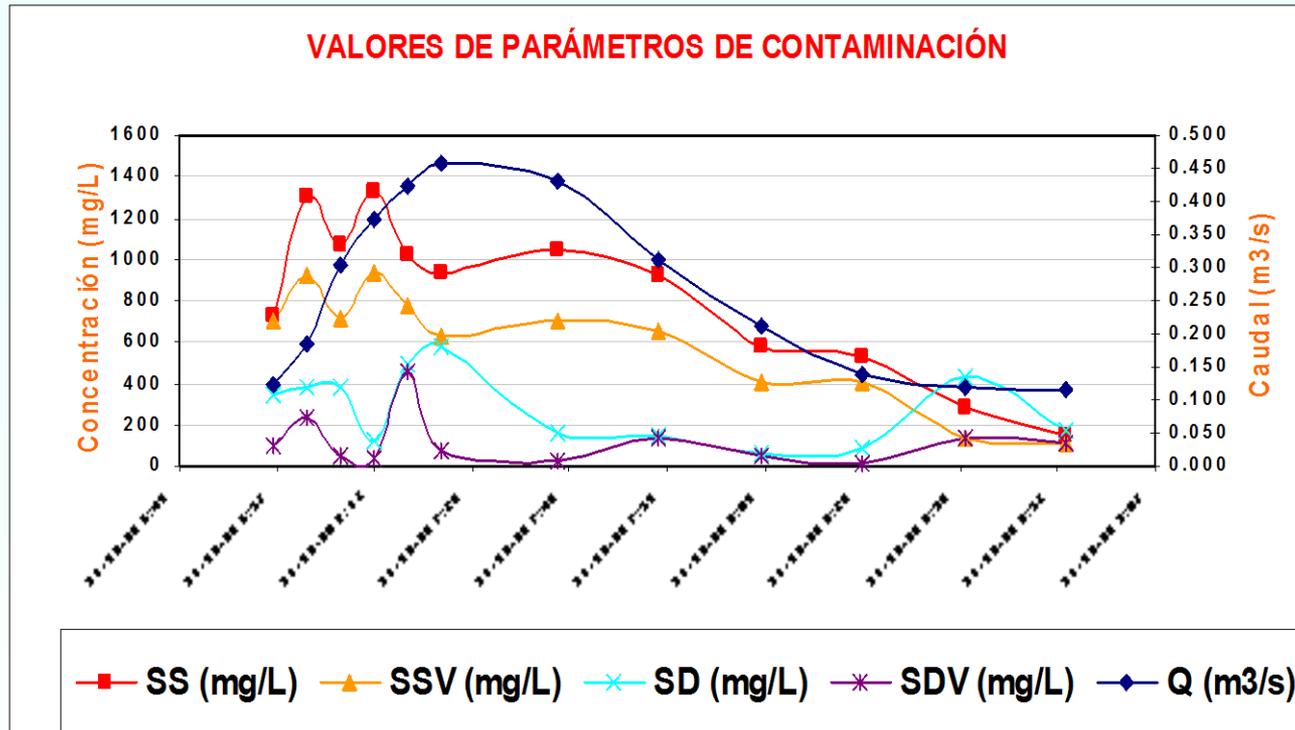
CONTAMINACIÓN PROMEDSU

SST-CONCENTRACIÓN MÁXIMA

Lognormal base 10 Distribution - ML Estimates - 95.0% CI
Complete Data



SUCESO SEVILLA-03



	Concentración máxima (mg/L)	CMS (mg/L)	Kg movilizados en interv. Muestreo
DQO	1472.0	977.0	1709.4
DBO₅	592.5	401.5	702.5
SS	1335.3	851.4	1489.7

PARÁMETROS EN INTERVALO DE MUESTREO

CAUDALES (m3/s)

MÍNIMO	0.114
MÁXIMO	0.496
MEDIO	0.279
COEF. PUNTA (Qmax/Qmin)	4.359

VOLÚMENES (m3)

TOTAL DEL SUCESO	1749.7
ASIGNADO A TIEMPO SECO	676.1
ASIGNADO A ESCORRENTÍA	1073.5
% ESCORRENTÍA/ TOTAL	0.6

	CONCENTRACIONES				MASAS TOTALES			
	[] MAX mg/L	[] MIN mg/L	[] MED mg/L	CMS mg/L	REGIST. Kg	T. SECO Kg	ESCORR. Kg	M.esc./M.total %
DQO	1472.0	286.0		977.0	1709.4	182.9	1526.5	0.89
DBO5	592.5	138.0		401.5	702.5	84.5	618.0	0.88
COT	102.5	19.4		57.7	100.9	12.1	88.9	0.88
NTK	94.2	36.9		54.5	95.3	27.0	68.2	0.72
NH4+	37.9	15.4		23.0	40.3	13.5	26.8	0.66
P-total	8.9	8.9		8.9	15.6	7.0	8.6	0.55
SS	1335.3	153.0		851.4	1489.7	72.0	1417.7	0.95
SSV	929.4	111.0		594.0	1039.3	86.7	952.6	0.92
SD	580.0	60.0		237.0	414.7	67.6	347.1	0.84
SDV	450.0	16.0		103.3	180.8	16.9	163.8	0.91
ST	1689.1	323.0		1088.4	1904.4	139.6	1764.8	0.93
Turbidez	344.0	61.5	228.5	----	----	----	----	----
Cond.	0.7	0.4	0.5	----	----	----	----	----
Temp	22.9	19.0	20.7	----	----	----	----	----
pH	8.6	6.9	7.5	----	----	----	----	----
Cu (dis)	0.017	0.017		0.017	0.030	0.015	0.015	0.50
Zn (dis)	0.034	0.034		0.034	0.059	0.054	0.005	0.09
Pb (dis)	0.660	0.660		0.660	1.155	0.007	1.147	0.99
HC (dis)	7.400	2.130		5.177	9.058	1.014	8.044	0.89







CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA

- **Factores que influyen en la movilización de las masas de contaminantes (Gupta et al., 1996):**
 - **Hora del día**
 - **Condiciones de tiempo seco**
 - **Duración del periodo de tiempo seco previo**
 - **Magnitud y características del contaminante en tiempo seco.**
 - **Tipo de lluvia**
 - **Características de la red de alcantarillado.**
 - **Forma y área de la cuenca drenante.**
 - **Sedimentos acumulados en la red.**

CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA

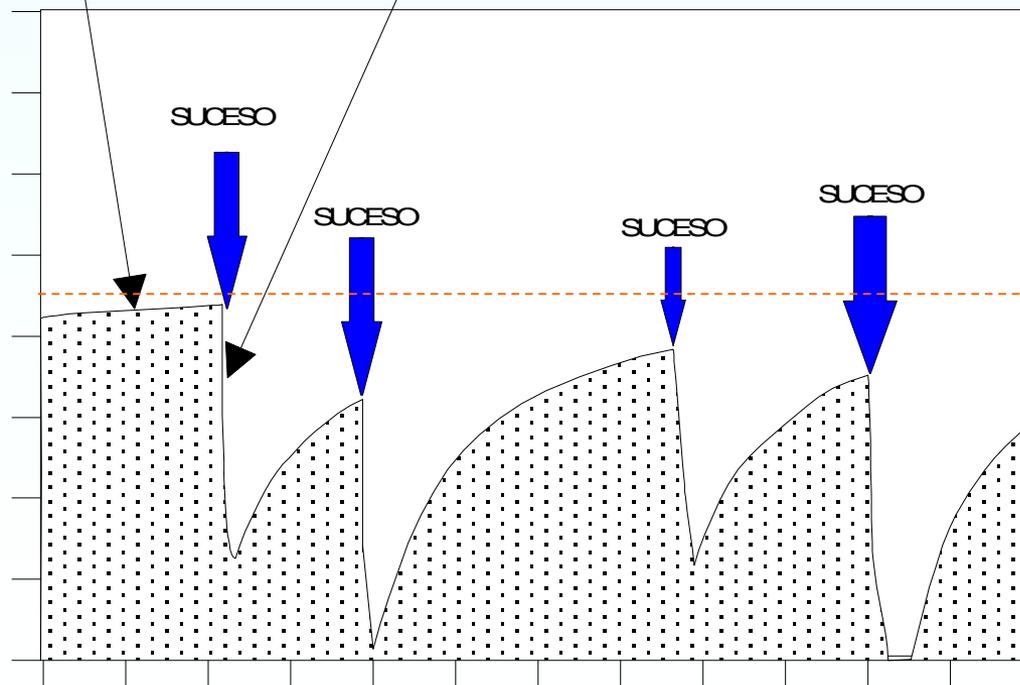
ECUACIÓN DE ACUMULACIÓN

f (USO DE CUENCA, DÍAS DE TIEMPO SECO PRECEDENTE, HÁBITOS DE LIMPIEZA)

ECUACIÓN DE LAVADO

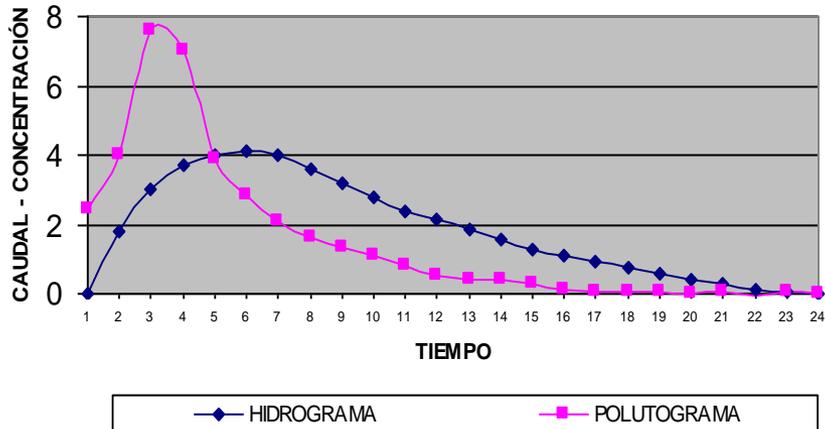
f (INTENSIDAD DE LA LLUVIA, TIPO DE PARTÍCULAS, MOMENTO DEL AGUACERO, CONSTANTE ESPECÍFICA)

MASA DE CONTAMINANTES
DISPONIBLE EN LA CUENCA

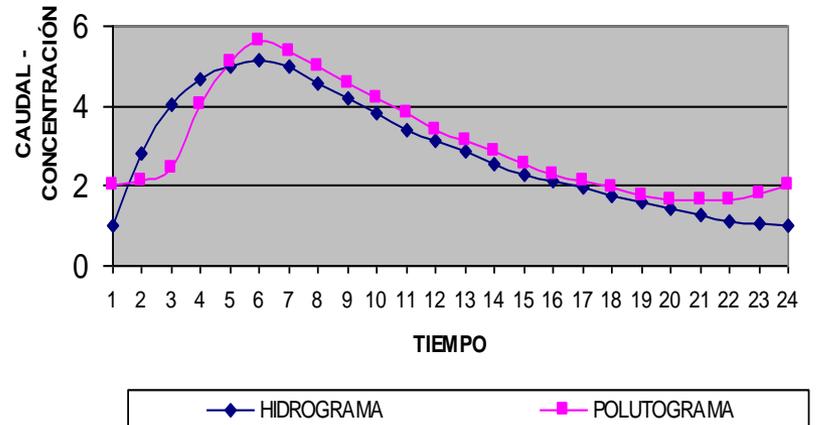


TIEMPO

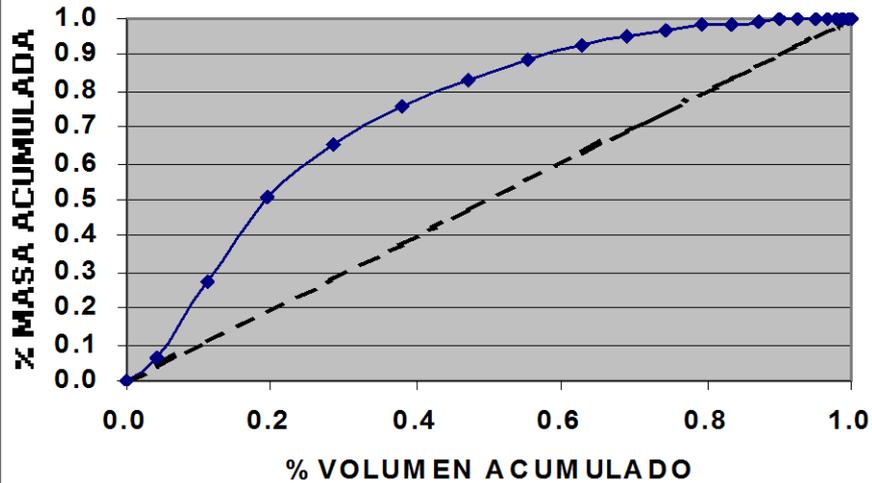
ANÁLISIS DE HIDROGRAMA Y POLUTOGRAMA



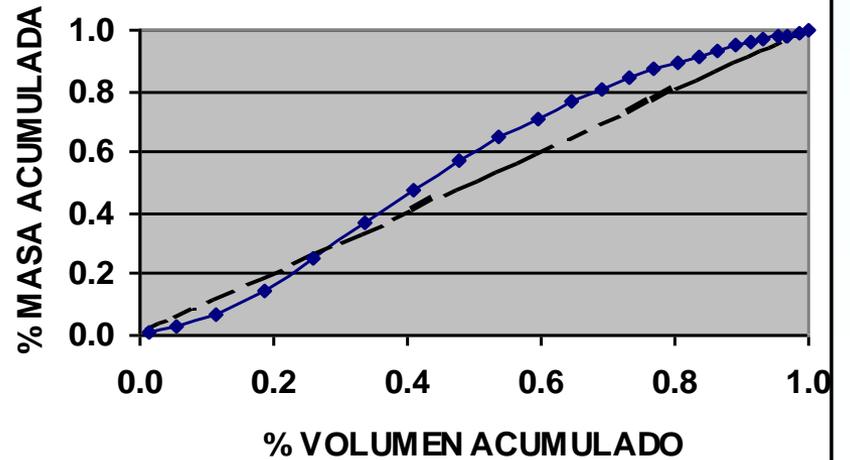
ANÁLISIS DE HIDROGRAMA Y POLUTOGRAMA



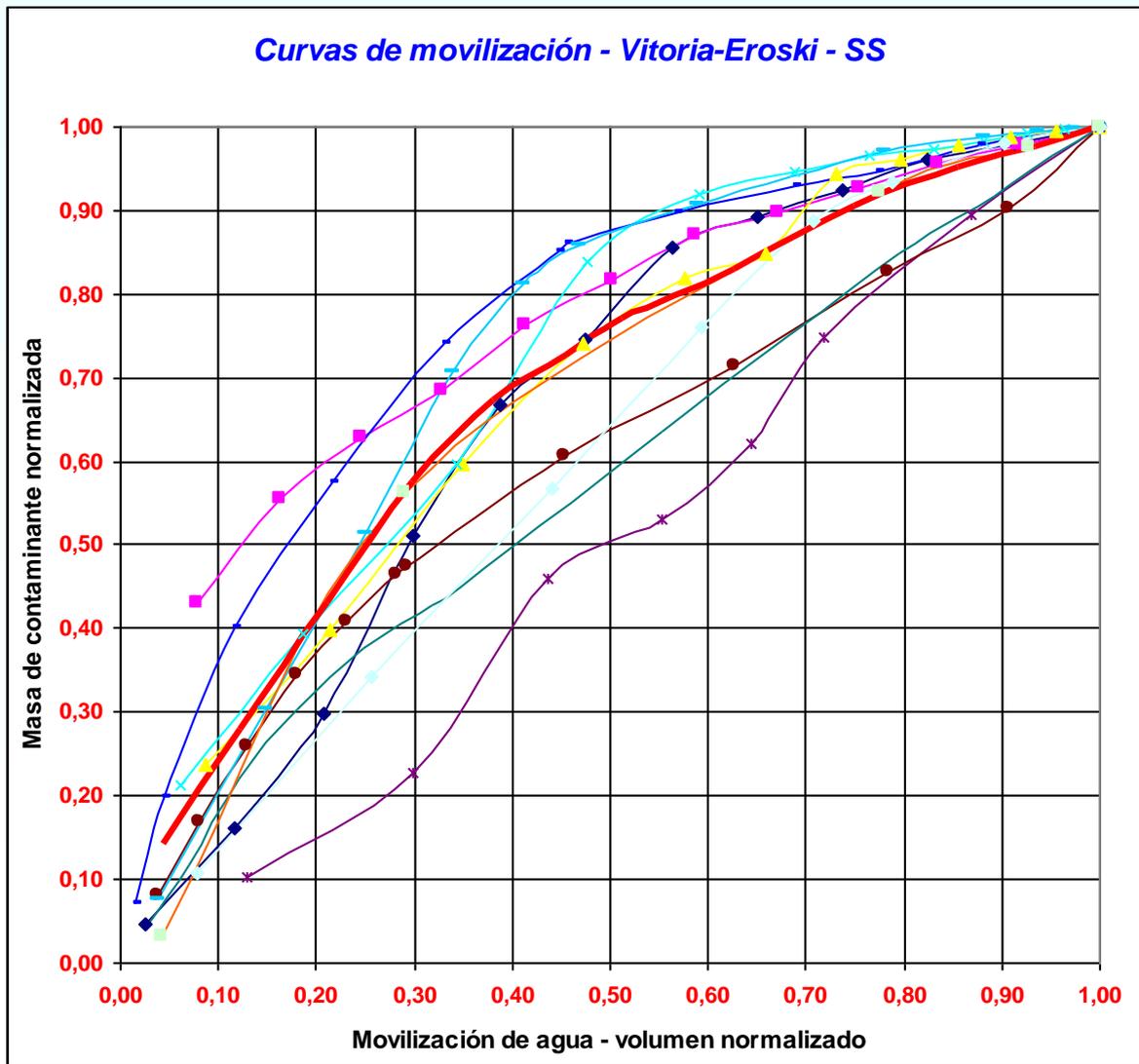
ANÁLISIS DE MOVILIZACIÓN DE MASAS



ANÁLISIS DE MOVILIZACIÓN DE MASAS



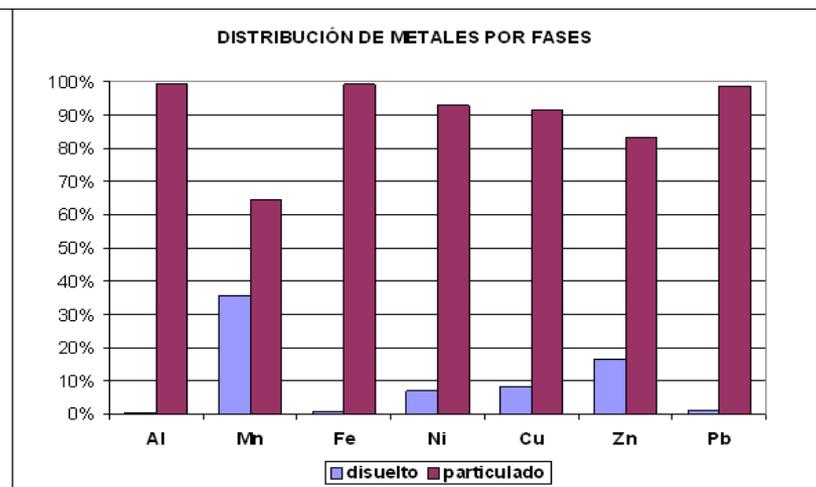
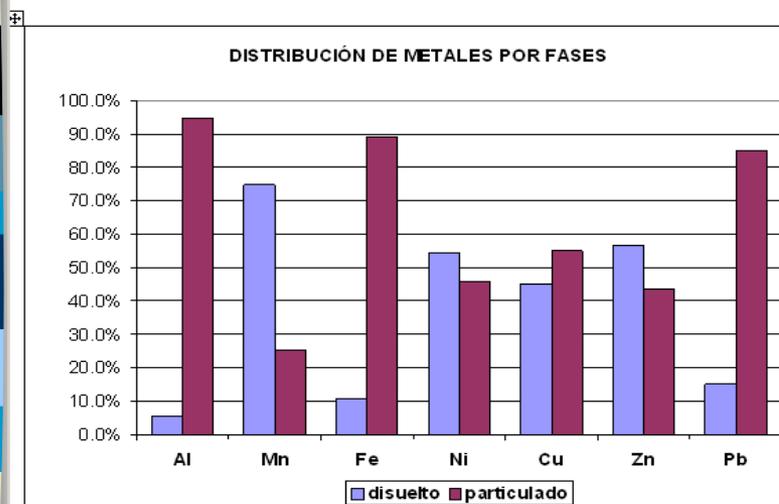
CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA



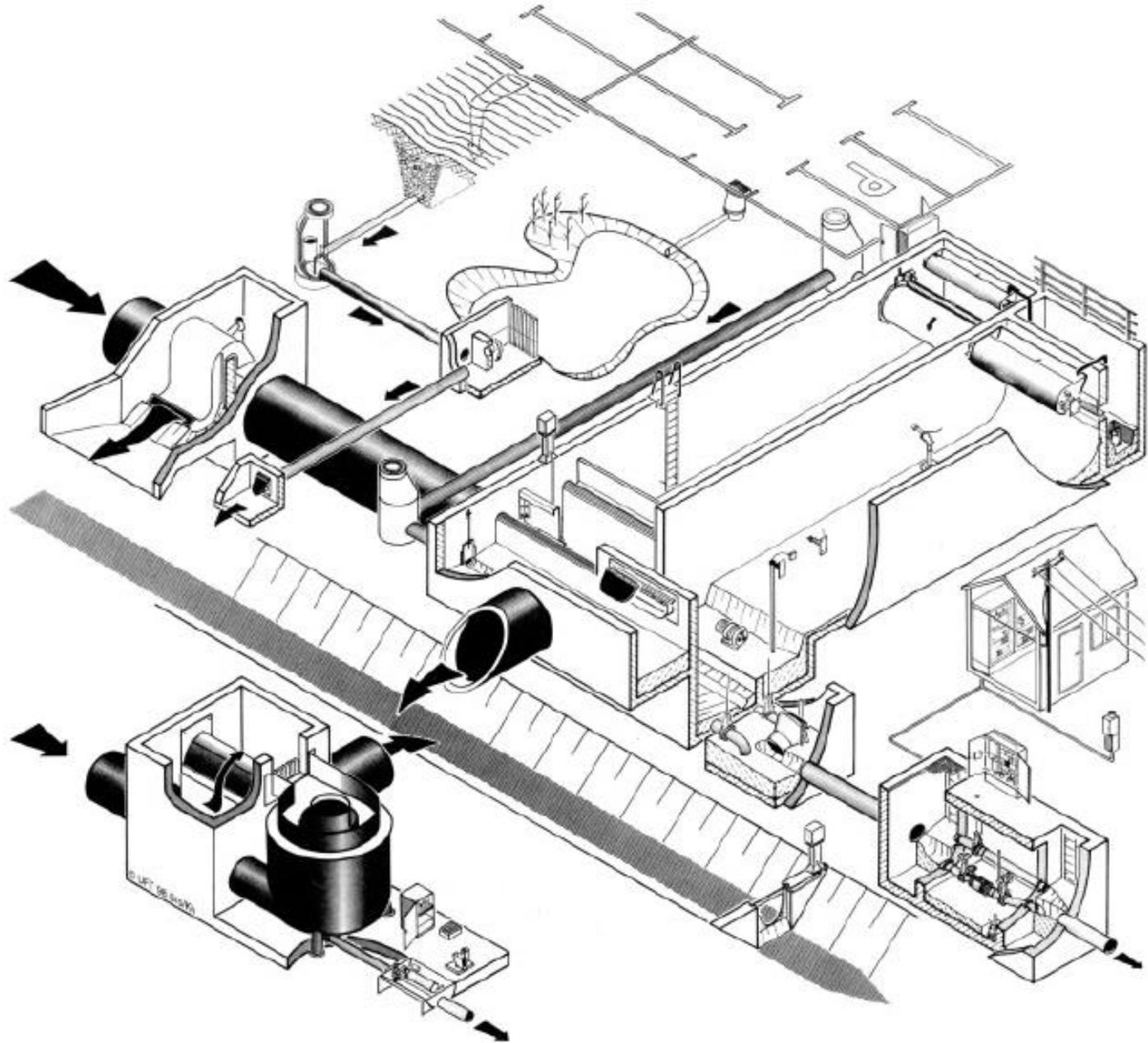
CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA

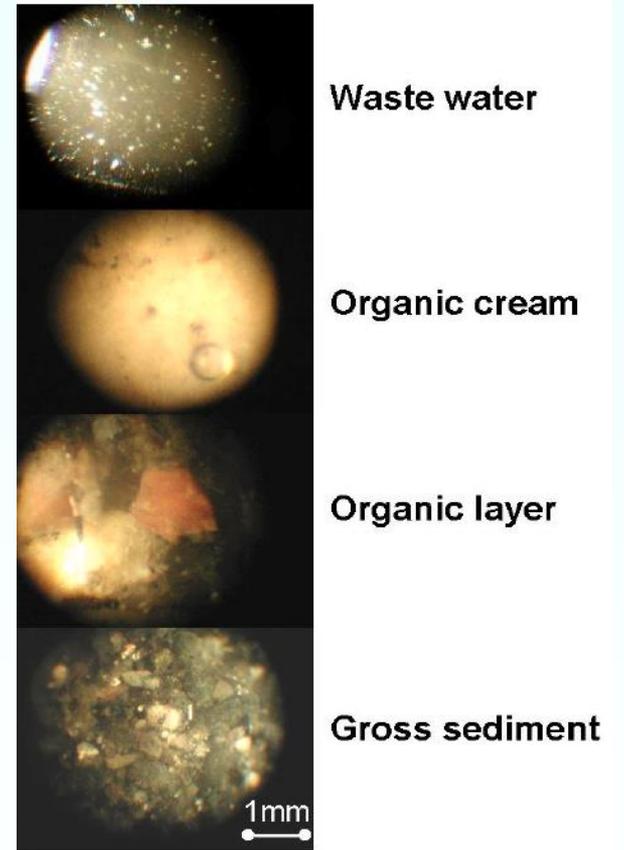
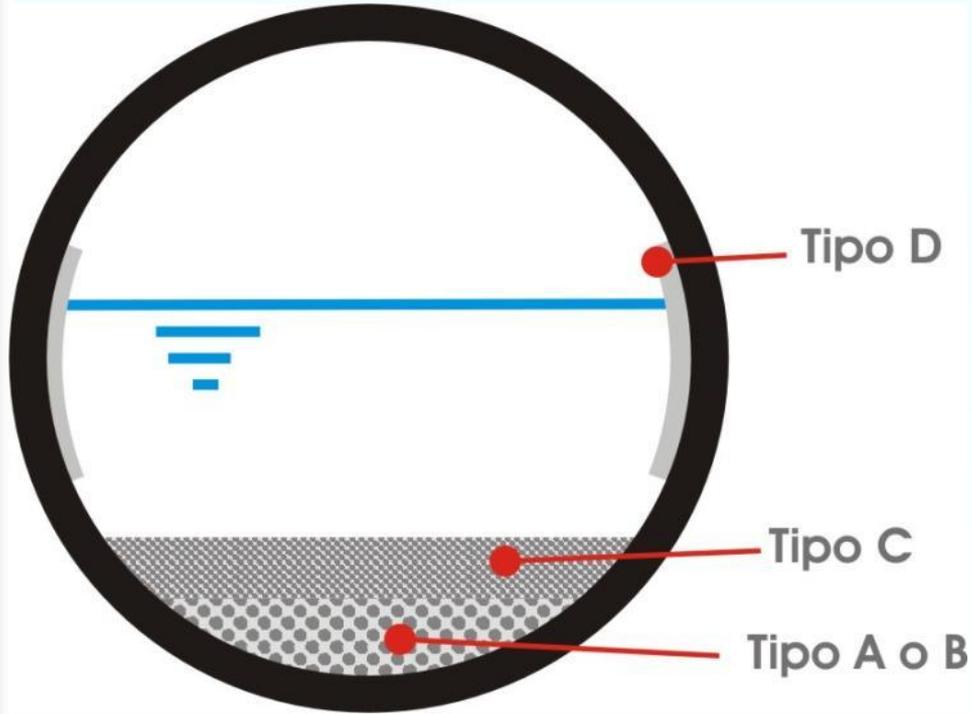
Ratios comparativos entre aguas residuales de tiempo seco y flujo en tiempo de lluvia

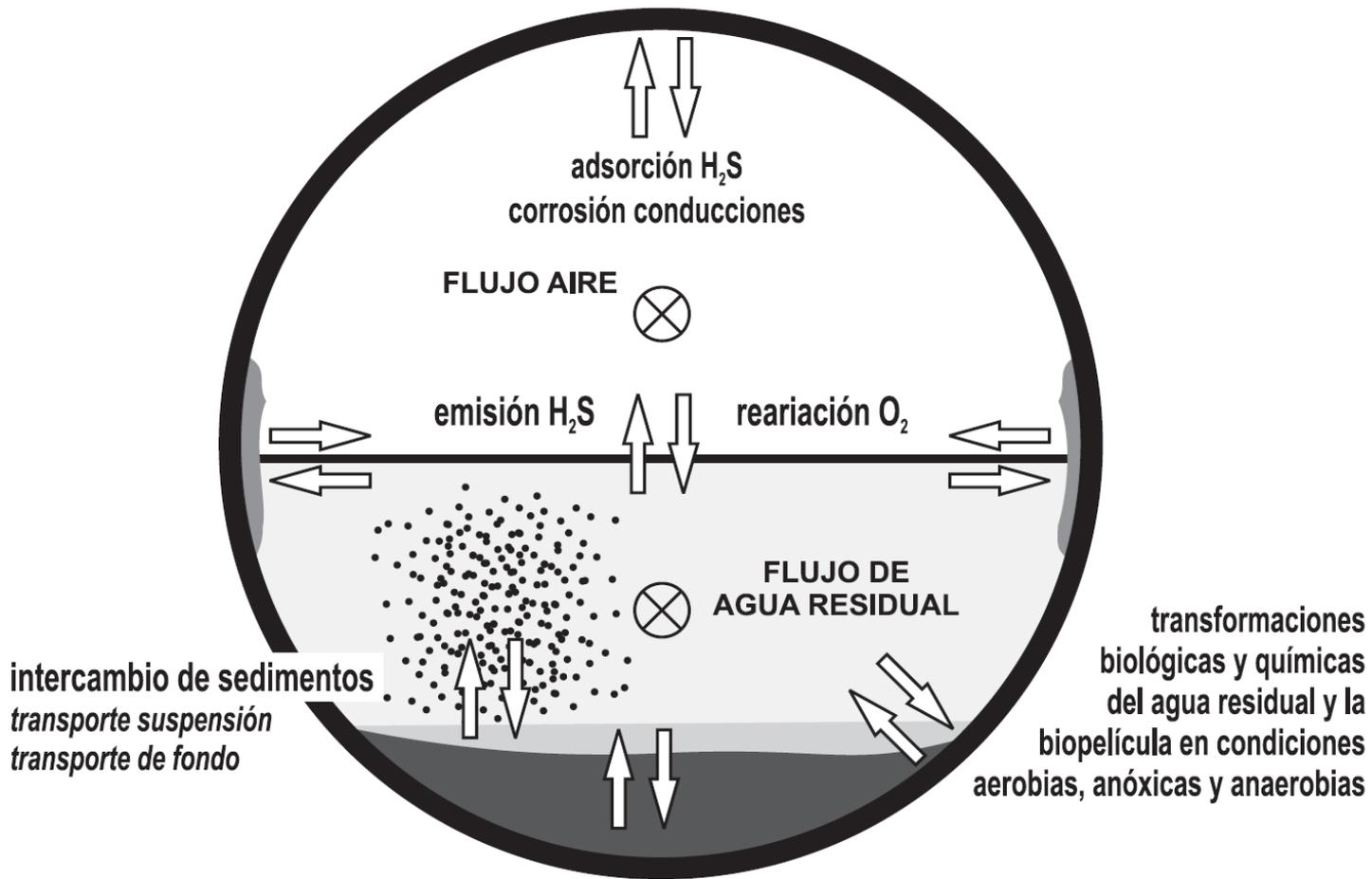
	TIEMPO SECO	TIEMPO DE LLUVIA
DQO total / DBO ₅	1.95	3.31
N. amoniacal / NTK	0.55	0.12
% DQO sedimentable/DQO total	38	68
% SSvolátiles/SStotales	49	42

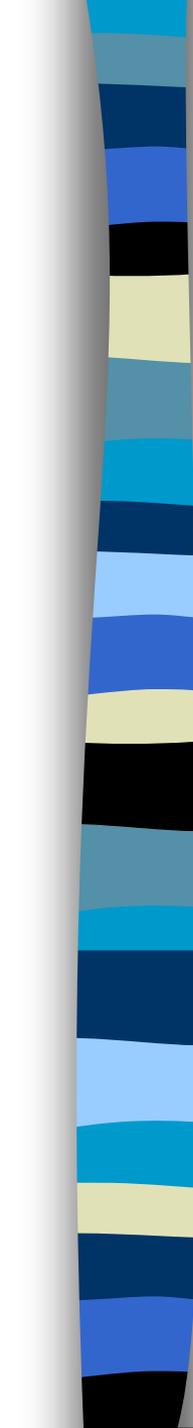


Presencia de los metales pesados (fase disuelta – fase particulada) en tiempo seco y en tiempo de lluvia.



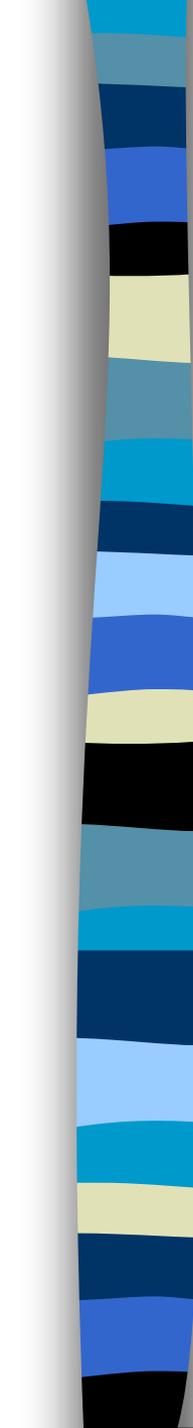






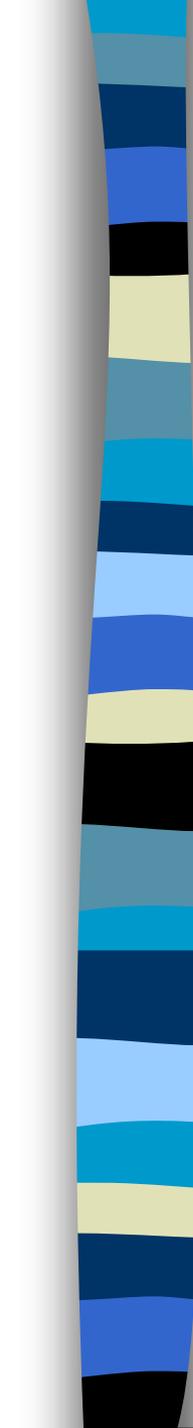
Conclusiones

- Los sedimentos de la red son los causantes de las altas concentraciones de sólidos que aparecen en las aguas en tiempo de lluvia en alcantarillados unitarios.
- Gran parte de esa contaminación, con concentraciones punta y masas muy importantes, va al medio receptor en poco espacio de tiempo desde los aliviaderos si en el sistema no se diseñan y construyen sistemas de control y tratamiento de reboses, o si no se desarrollan estrategias de gestión de escorrentías en la superficie de la cuenca (por ejemplo Técnicas de Drenaje urbano Sostenible - TDUS).



Conclusiones

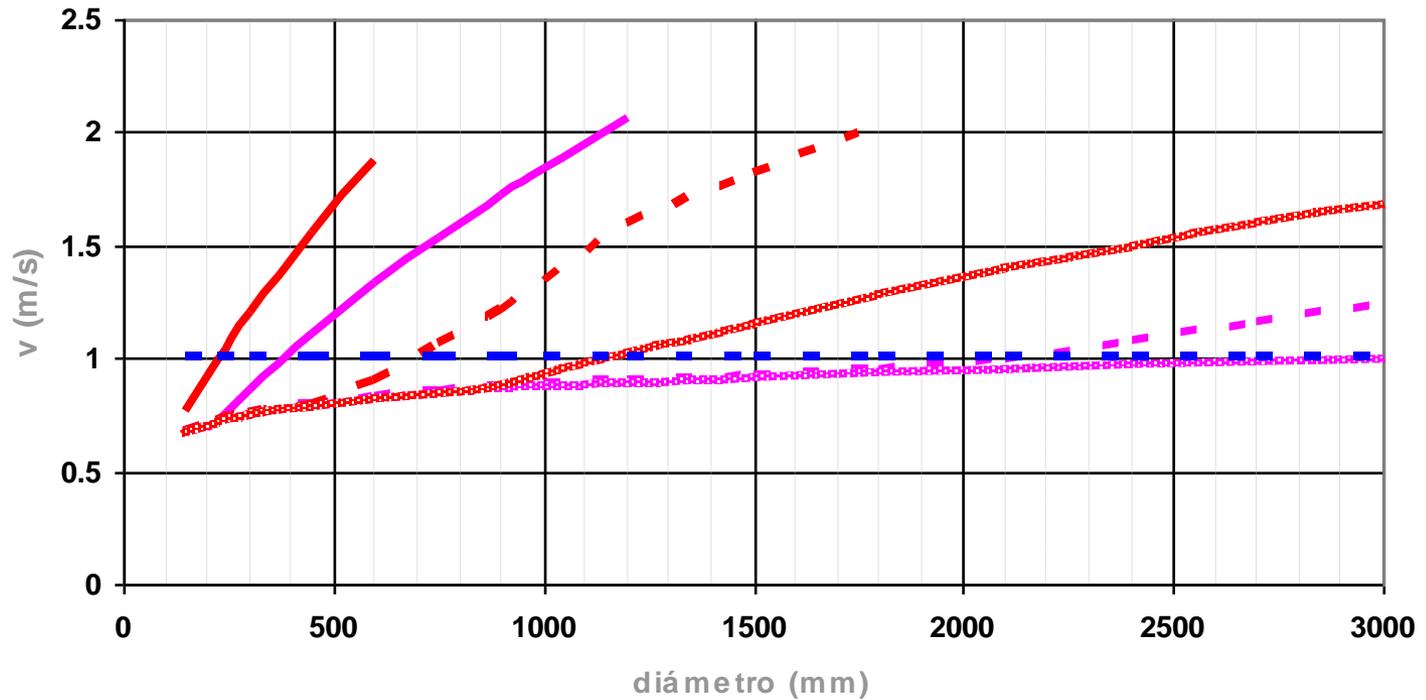
- Los sedimentos, fangos, biopelículas u otros materiales presentes en la red de alcantarillado, tienen una complejidad tanto en tamaños, como en cohesión, reactividad, etc., que hace que modelos utilizados en el diseño de conducciones para evitar su formación no sean del todo efectivos.
- Modelos como el de Shields, útil con material granulado sin cohesión, no contempla la complejidad de los materiales presentes en el alcantarillado.



Conclusiones

- Un buen análisis y comparación de modelos de interés para estudiar la acumulación, la resuspensión y el transporte de materiales en la red de alcantarillado se realiza en el trabajo “Design of Sewer to Control Sediment Problems” (Ackers et al., 1996), realizado por el CIRIA.
- Las prácticas preventivas de limpieza del alcantarillado que eviten la disminución de la sección útil y las obstrucciones, además de evitar o disminuir los malos olores, son técnicas, en definitiva, que ayudan a minimizar la emisión de contaminantes en tiempo de lluvia.

Velocidades mínimas de diseño en redes de saneamiento unitaria y de fecales.



- Ackers et al. Carga sedimentos media. 2% depósito.
 — Ackers et al. Carga sedimentos media. auto limpiable.
- - - Ackers et al. Carga sedimentos alta. 2% depósito.
 — Ackers et al. Carga sedimentos alta. auto limpiable.
- ⋯ Ackers et al. Redes separativas de fecales. Carga media.
 ⋯ Ackers et al. Redes separativas de fecales. Carga alta.
- BS 8005.

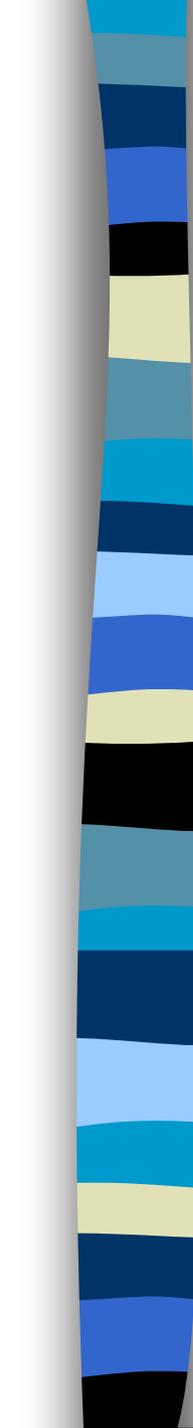
TABLA 5**Velocidad de autolimpieza para un calado = 50% DN**

Diámetro (mm)	Velocidad crítica (m/s)	Diámetro (mm)	Velocidad crítica (m/s)
300	0,56	1.400	1,34
400	0,67	1.500	1,39
500	0,76	1.600	1,44
600	0,84	1.800	1,54
800	0,98	2.000	1,62
1.000	1,12	2.200	1,72
1.200	1,24	2.400	1,79

TABLA 6

Coefficiente α de conversión
Velocidad crítica para cualquier calado
 $V_{crit} = \alpha \times V_{crit\ 50\%}$

Grado de llenado (d/DN)	α
< 0,1	1,37
0,10	1,22
0,20	1,10
0,30	1,04
0,40	1,01
0,50	1,00
0,60	0,99
0,70	1,00
0,80	1,01
0,90	1,04
1,00	1,15



[Blank writing area]

Contaminación en redes de saneamiento: tiempo seco y tiempo de lluvia

Joaquín Suárez López, José Anta Álvarez, Jerónimo Puertas Agudo, Alfredo Jácome Burgos

*Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente – GEAMA
Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC)
Universidade da Coruña
jsuarez@udc.es*

1.- Prólogo

La contaminación de las descargas de los sistemas unitarios (DSU) (o reboses de alcantarillados unitarios, RAU), está fuertemente determinada por las características de las aguas residuales urbanas de tiempo seco, de los usos o actividades que se realizan en la superficie de las cuencas urbanas que luego van a ser lavadas por las aguas pluviales, y por el arrastre de materiales y sedimentos depositados en las conducciones y demás elementos auxiliares de la red de alcantarillado durante los períodos secos.

En la presente comunicación se realiza, en primer lugar, una revisión de valores de contaminación medidos en flujos de sistemas unitarios en tiempo de lluvia (DSUs) y se analiza su origen. En segundo lugar, se hace una rápida revisión del comportamiento de la contaminación de las aguas residuales en tiempo seco en los sistemas unitarios, revisión necesaria para comprender lo que ocurre en tiempo de lluvia. A continuación se analiza la contaminación que es movilizada en tiempo de lluvia desde la superficie de la cuenca y finalmente la que procede de los sedimentos acumulados. En último lugar se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones.

2.- Introducción

El criterio que se seguía históricamente para el diseño de aliviaderos en una solución de saneamiento se basaba en la dilución; la hipótesis básica de este método era que las aguas de lluvia procedentes de la cuenca estaban limpias (aguas blancas). En el momento en que se iniciaba el vertido tanto el caudal que se enviaba aguas abajo por el alcantarillado como el vertido al medio receptor presentan la misma dilución, que es la de diseño. Una dilución de cuatro veces, por ejemplo, significa que en el rebose están presentes una parte de agua residual y tres partes de agua de lluvia; frecuentemente se escribe: 1+3. Dependiendo de la bibliografía que se consultase el valor de la dilución de diseño variaba notablemente. Las cifras habituales oscilaban entre 3 y 6 (Ranchet J. y Ruperd Y., 1983); Paz Maroto J. y Paz Casañé J. M^a. (1968) daban un valor fijo de 5; Camp (1959) mencionaba valores que van de 2 a 5; las normas alemanas (Pecher R., 1992) especificaban una cuantía de 7.

Hoy en día es bien sabido que las aguas “blancas” no son tales y que la contaminación movilizada en las mismas es importante y que los vertidos al medio receptor en tiempo de lluvia aportan a los sistemas acuáticos cargas muy importantes de contaminación.

Los primeros esfuerzos para devolver la calidad de las aguas a los medios acuáticos naturales se centro el control de los vertidos puntuales mediante la construcción y explotación de estaciones de depuración de aguas residuales. Después de un fuerte desarrollo en sistemas de tratamiento se comprobó que en muchos países la calidad de las aguas no era todavía satisfactoria (Ellis, 1991). Se observó que una gran parte del problema era originado por los vertidos intermitentes que se producían durante y después de las lluvias desde los alcantarillados separativos y unitarios de las aglomeraciones urbanas. A los generados desde los sistemas unitarios se les ha denominado “reboses de alcantarillado unitario” (RAU), descargas de sistemas unitarios (DSU), alivios de tormenta (C.H.N., 1995), o “Combined Sewer Overflows” (CSO), en la literatura anglosajona.

Fue en EE.UU. en donde por primera vez se reconoció la importancia de este problema en la “Federal Water Control Act Amendments” de 1972. Después de años de estudios de caracterización de este tipo de sucesos se propusieron las medidas de control pertinentes y se comprobó el elevado coste económico que

suponía minorar la contaminación que era vertida al medio acuático a través de este tipo de vertidos (“Cost Methodology of Combined Sewer Overflows and Storm Discharges”, EPA-430/9-79-003). A pesar de que desde esos años se llevan invertidos muchos recursos en el conocimiento y control del problema todavía hoy sigue siendo una de las principales causas de contaminación de los sistemas acuáticos.

En Europa el control de la contaminación del agua de origen urbano siguió pautas similares a las de EE.UU. y concluyó también, al término de la década de los 80, que la eliminación o minimización de los reboses de los sistemas unitarios debía considerarse como objetivo prioritario en los planes de saneamiento y mejora de la calidad del agua de los sistemas acuáticos. La Directiva 91/271 sobre tratamiento de aguas residuales es, sin embargo, poco explícita en relación con este problema; sólo cita de forma genérica que todo tipo de agua que entre en una red unitaria deberá ser tratada y cita de forma explícita la necesidad de minimizar los vertidos de las aguas de tormenta. Deja a los estados miembros la libertad de limitar la contaminación del agua de los reboses mediante el establecimiento de una determinada dilución en un momento del vertido o la imposición de un número máximo de reboses al año.

En España, en donde predomina el alcantarillado unitario, el problema es evidente pero no se empezó a analizar hasta la década de los ochenta. Los primeros estudios de caracterización de la contaminación de las aguas de escorrentía fueron llevados a cabo por Hernández y Hontoria (1986) en pequeñas cuencas piloto en calles de Madrid. Cabe destacar el “workshop” realizado en Benicassim en 1995, en el que se puso de manifiesto la importancia de este problema (Malgrat, P.; 1995). Asimismo, a partir de comienzos de los años noventa se comenzaron a realizar estudios en las Escuelas de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, la Universidade da Coruña y la Politécnica de Cataluña, orientados a la caracterización de sucesos de lluvia en redes de alcantarillado unitario y a la modelización de la contaminación en tiempo de lluvia en los sistemas de saneamiento y drenaje.

En la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) el “Grupo Avanzado de Drenaje Urbano (GADU)” empezó, también a mediados de la década de los noventa, a analizar el problema y como fruto de ello se propuso al Ministerio de Medio Ambiente la realización del “Programa Nacional de Medición de las Descargas de los Sistemas Unitarios” (PROMEDSU). Este programa tuvo dos años de duración y ha puesto de manifiesto la grave problemática de la contaminación movilizada en tiempo de lluvia en redes unitarias.

Las características de la contaminación de los desbordamientos de los sistemas unitarios (DSU) o RAU (reboses de alcantarillados unitarios) está fuertemente determinada por las características de las aguas residuales urbanas de tiempo seco, de los usos que se realizan en la superficie de las cuencas urbanas que luego van a ser lavadas por las aguas de escorrentía, y por el arrastre de materiales y fangos depositados en las conducciones durante los períodos secos.

Los impactos de los RAU pueden ser muy negativos. Determinan una pérdida muy importante de la eficacia del sistema, cuyo fin es la protección del medio acuático receptor. La incorporación de sistemas de control y tratamiento de estos reboses, determina una nueva relación entre las fuentes de contaminación y caudales, los sistemas de transporte y el medio receptor.

Una visión integral de la gestión del sistema que minimice los impactos y permita alcanzar los objetivos de transporte y mantenimiento de la calidad del agua fijados en los sistemas acuáticos obliga a desarrollar una estrategia de control total de la contaminación. La contaminación que se permita entrar a la red de saneamiento desde la cuenca (por escorrentía o por aguas residuales urbanas), las transformaciones que dicha contaminación sufra en la red, la capacidad de transporte de la red y las diluciones que se permitan en los reboses, los sistemas de control y tratamiento que se implanten a lo largo de la red, determinarán qué tipo de aguas residuales, caudales y cargas recibirá la EDAR, y condicionarán su diseño y sus estrategias de explotación.

Además, no debemos olvidar que la gestión de los DSU va a ser siempre difícil, tal y como se pone de manifiesto analizando simplemente uno de los factores, la lluvia, de naturaleza estocástica, por lo que será imposible una protección absoluta del medio receptor.

3.- Medidas de contaminación en tiempo de lluvia

El “Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios” (PROMEDSU) fue un proyecto promovido por el Ministerio de Medio Ambiente para caracterizar los flujos de los alcantarillados unitarios en tiempo de lluvia, que se llevó a cabo entre mayo de 2000 y abril de 2001 (MMA, 2002).

Operativamente, el estudio consistió en la ubicación de equipos de medida de parámetros de contaminación de aguas en el saneamiento de cinco cuencas urbanas pertenecientes a otras tantas ciudades españolas. Las subcuencas estudiadas fueron: Bac de Roda (170 ha, Barcelona), Arroyo del Fresno (3800 ha, Madrid), Los Remedios (135 ha, Sevilla), Malvarrosa (90 ha, Valencia), Almendra (132 ha, Vitoria)

Los objetivos fueron:

A escala de cuenca:

- Conocimiento detallado del funcionamiento de una cuenca genérica en cinco ciudades españolas.
- Correlaciones pluviales – hidrológicas – ambientales.
- Apoyo a los Ayuntamientos.

A escala local:

- Extrapolación a otras cuencas de la misma ciudad.
- Estimación de cargas anuales vertidas en relación con las características singulares del entorno urbano.

A escala nacional:

- Conocimiento de la situación de partida.
- Comparaciones con otros países.

De las cinco subcuencas estudiadas sólo una de ellas, Arroyo del Fresno (Madrid), puede considerarse una cuenca con características heterogéneas y difícil de conocer en detalle, ya que es de una gran extensión y usos muy 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 tienen cierta extrapolabilidad a cuencas del mismo ámbito geográfico.

Otro estudio al que se va a hacer referencia es el desarrollado en una subcuenca del sistema de saneamiento de Santiago de Compostela. El estudio fue desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña y fue financiado por la CICYT (CICYT HID99-0310); su título era “Evaluación de rendimientos de sistemas de control y tratamiento de reboses (SCTR) de alcantarillado en una cuenca de la España Húmeda (obtención a partir de series de hidrogramas y polutogramas reales)”.

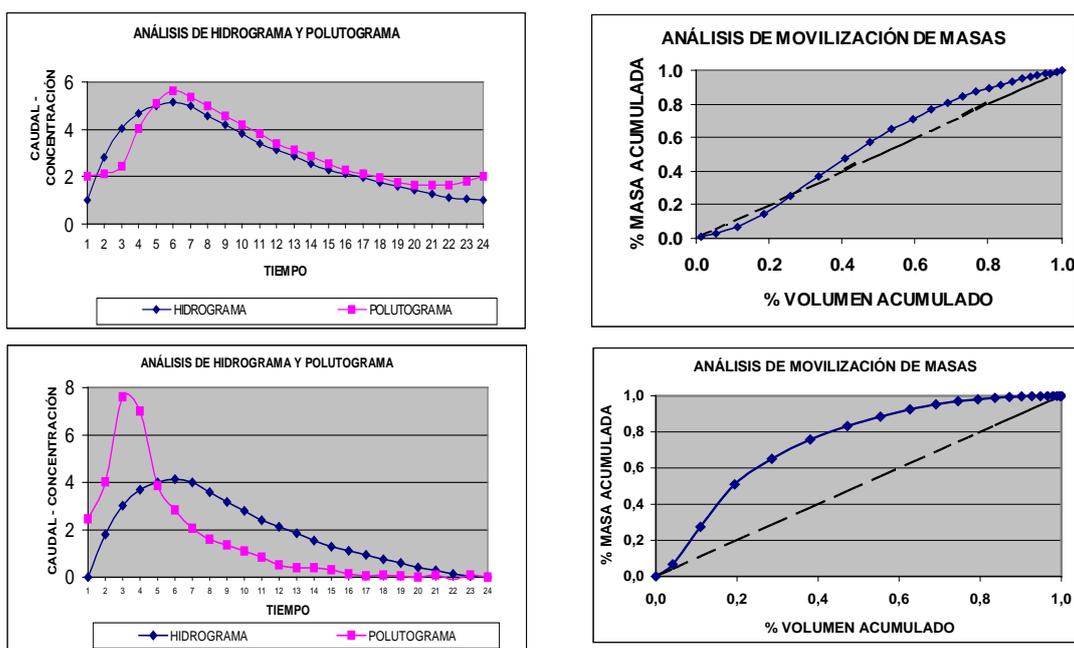


Figura 1.- Croquis con diferentes tipos de situaciones hidrograma-polutograma.

Cuando en una cuenca se produce una lluvia los fenómenos de movimiento del agua y de movilización y transporte de contaminación tienen un carácter muy transitorio. Cada suceso de lluvia genera en el sistema de alcantarillado una gran variación de caudales y, también, una gran variación de concentraciones, y por lo tanto de flujos másicos. Para caracterizar los flujos es necesario medir y estudiar los hidrogramas y los polutogramas que se producen. La variabilidad y forma de los mismos es enorme, por lo que es habitual definir una serie de parámetros que permitan caracterizar el fenómeno. Un parámetro muy utilizado es la “concentración media de suceso” (CMS), que es una concentración media ponderada con el caudal.

$$CMS = \frac{\text{Masa_total_de_contaminante_en_la_escorrentía}}{\text{Volumen_total_de_escorrentía}} = \frac{\sum Q_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum Q_i \cdot \Delta t_i}$$

A continuación se presentan el histograma, el hidrograma y diferentes polutogramas del suceso “Sevilla 03” medido durante las campañas del PROMEDSU.



Figura 2.- Hietograma e hidrograma del “Suceso Sevilla 03”.

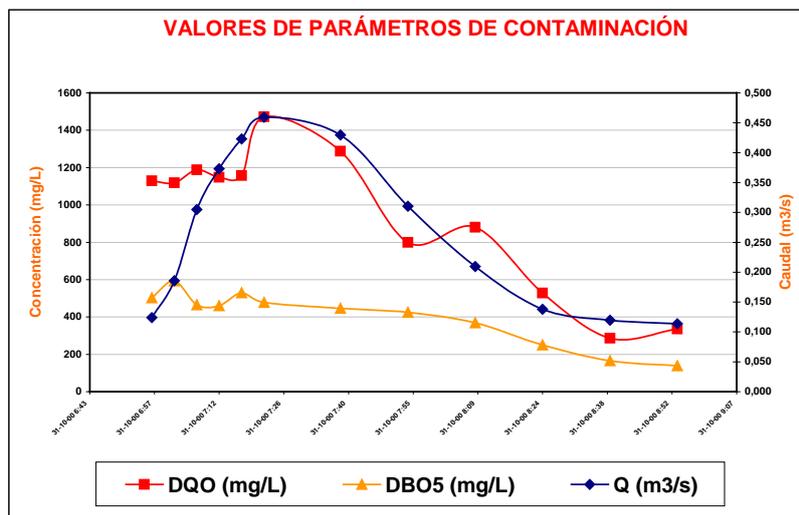


Figura 3.- Hidrograma y polutogramas del “Suceso Sevilla 03”.

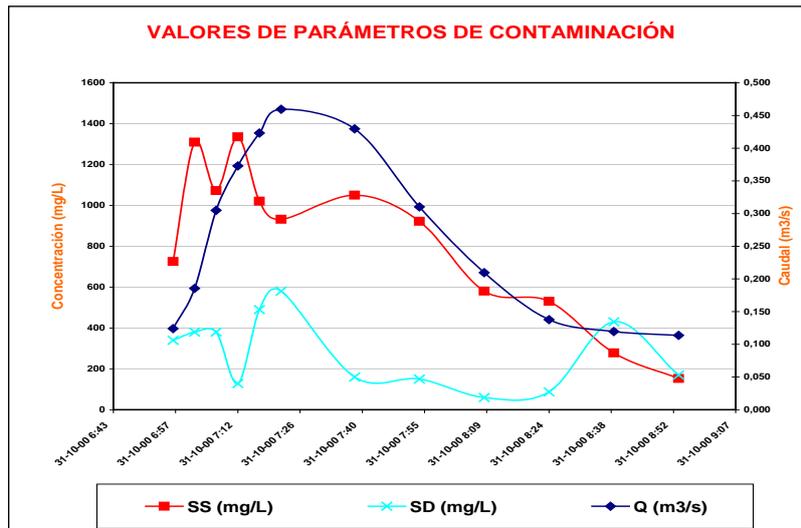


Figura 4.- Hidrograma y polutogramas del "Suceso Sevilla 03".

Se pueden destacar los siguientes valores de interés:

Caudal máximo: 0.496 m³/s

Intervalo de tiempo de muestreo: 120 minutos

Volumen del suceso en el tramo muestreado: 1749.7 m³.

Tabla 1.- Valores de interés de concentraciones máximas y CMS en el "Suceso Sevilla 03".

	Concentración máxima (mg/L)	CMS (mg/L)	Kg movilizados en interv. Muestreo.
DQO	1472	977	1709
DBO ₅	593	402	703
SS	1335	851	1490

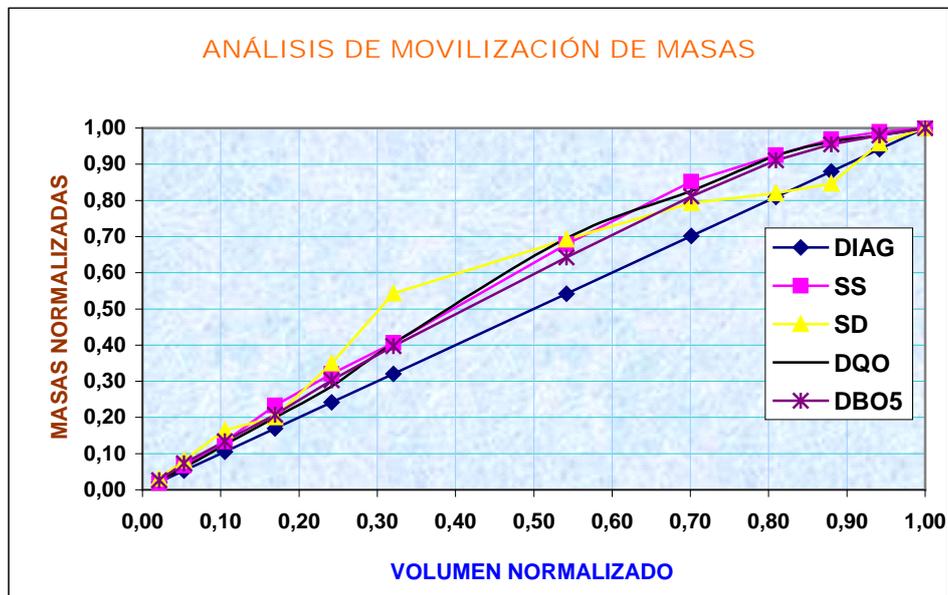


Figura 5.- Ejemplos de curvas de movilización de agua y contaminantes en el suceso SEVILLA-03

A continuación se presentan un dos tablas con las concentraciones máximas y las CMS de los sucesos caracterizados en el PROMEDSU y los valores obtenidos en la subcuenca "Cancelón" en Santiago de Compostela.

Tabla 2.- Comparación de las CMS obtenidas en la cuenca piloto “Cancelón” de Santiago con el resto de cuencas estudiadas en el PROMEDSU (Beneyto, 2004).

CMS (mg/L)	PROMEDSU						Santiago	Val. medio tiempo seco
	Sevilla	Madrid	Vitoria	Valencia	MÁXIMO	MEDIA		
DQO	834	680	1004	293	1004	582	224	500
DBO ₅	389	384	344	166	389	270	68	220
COT	35	53	29	35	53	36	24	160
NTK	46	38	23	41	46	32	23	40
N-NH ₄ ⁺	22	19	9	14	22	12	3	25
P-PO ₄ ³⁺ total	4.9	7.5	9.1	6.2	9.7	7.0	4.6	8
SST	733	597	562	229	733	505	328	220
SSV	487	353	301	134	487	283	139	165
SDT	325	362	499	964	2250	753	115	500
SDV	132	173	326	279	326	190	42	200
ST	1058	959	1062	1194	2830	1257	442	720
Cu (dis)	0.03	0.05	0.02	0.02	0.05	0.03	0.01	0.070
Zn (dis)	0.38	0.32	0.83	0.16	0.83	0.35	0.04	0.200
Pb (dis)	0.38	0.10	0.08	0.04	0.38	0.12	0.00	0.065

Tabla 3.- Comparación de valores máximos de concentraciones máximas instantáneas obtenidos en la cuenca piloto “Cancelón” de Santiago con el resto de cuencas estudiadas en el PROMEDSU (Beneyto, 2004).

Concentraciones máximas (mg/L)	PROMEDSU						Santiago	Val. medio tiempo seco
	Sevilla	Madrid	Vitoria	Valencia	MÁXIMO	MEDIA		
DQO	3260	2384	14200	967	14200	4274	2497	500
DBO ₅	1150	1625	7200	505	7200	2248	760	220
COT	103	280	100	97	280	146	131	160
NTK	110	115	93	100	115	104	103	40
N-NH ₄ ⁺	76	67	29	28	76	43	30	25
P-PO ₄ ³⁺ total	11.1	18.5	35	9	90	31	24	8
SST	3394	2773	3255	1167	3394	2756	3052	220
SSV	2623	1953	1876	748	2623	1801	1806	165
SDT	880	3000	13572	2924	23967	7459	412	500
SDV	640	2680	13488	684	13488	3541	212	200
ST	4274	3402	13833	3007	24287	8711	3464	720
Cu (dis)	0.084	0.141	0.084	0.024	0.141	0.074	0.038	0.070
Zn (dis)	1.062	0.813	3.310	0.276	3.310	1.137	0.223	0.200
Pb (dis)	0.754	0.310	0.264	0.100	0.754	0.287	0.007	0.065

Otro parámetro representativo de la movilización de contaminación en una cuenca es la masa de contaminante movilizado por ha o m² impermeable de la cuenca. Este valor puede referirse a un periodo largo de tiempo, como un año, o a un suceso determinado. En la tabla siguiente se recogen los valores medios obtenidos en el PROMEDSU y en la cuenca del “Cancelón”.

Tabla 4.- Comparación de las carga movilizada (g/m² netos) en la cuenca piloto “Cancelón” de Santiago con el resto de cuencas estudiadas en el PROMEDSU (Beneyto, 2004).

Cargas movilizadas (g/m ²)	PROMEDSU							Santiago
	Sevilla	Madrid	Barcelona	Vitoria	Valencia	MÁXIMO	MEDIA	
DQO	1.30	0.20	9.41	1.96	2.59	9.41	2.62	0.28
DBO ₅	0.55	0.11		0.60	1.49	1.49	0.56	0.07
COT	0.05	0.02	0.85	0.05	0.52	0.85	0.26	0.04
NTK	0.05	0.01	0.40	0.03	0.39	0.40	0.15	0.03
N-NH ₄ ⁺	0.02	0.00	0.14	0.01	0.24	0.24	0.07	0.02
P-PO ₄ ³⁺ total	0.01	0.00	0.16	0.02	0.07	0.16	0.05	0.06
SST	1.28	0.21	16.48	1.21	1.88	16.48	3.59	0.50
SSV	0.83	0.11		0.64	1.17	1.17	0.59	0.20
SDT	0.47	0.11	99.02	1.18	14.52	99.02	19.24	0.12
SDV	0.18	0.07		0.77	3.54	3.54	0.92	0.05
ST	1.75	0.32	116.01	2.40	16.39	116.01	22.92	0.62
Cu (dis)	0.00006	0.00002		0.00006	0.00029	0.00029	0.00011	0.00011
Zn (dis)	0.00066	0.00014		0.00250	0.00162	0.00250	0.00109	0.00052
Pb (dis)	0.00069	0.00003		0.00025	0.00052	0.00069	0.00030	0.00001

Una herramienta útil para analizar el comportamiento de la contaminación en una cuenca en tiempo de lluvia es el uso de funciones de probabilidad. Se puede utilizar una función estadística de probabilidad que ajuste los resultados de contaminación obtenidos en campo. Como en otros muchos estudios, en el PROMEDSU y en los trabajos realizados en la cuenca del “Cancelón”, se encontró que la distribución *log-normal* proporcionaba el mejor ajuste a los datos experimentales. En la figura siguiente se presentan una comparación de las funciones de probabilidad de mejor ajuste para el “Cancelón” y todos los valores del PROMEDSU para las concentraciones máximas y CMS de DBO₅ y SS..

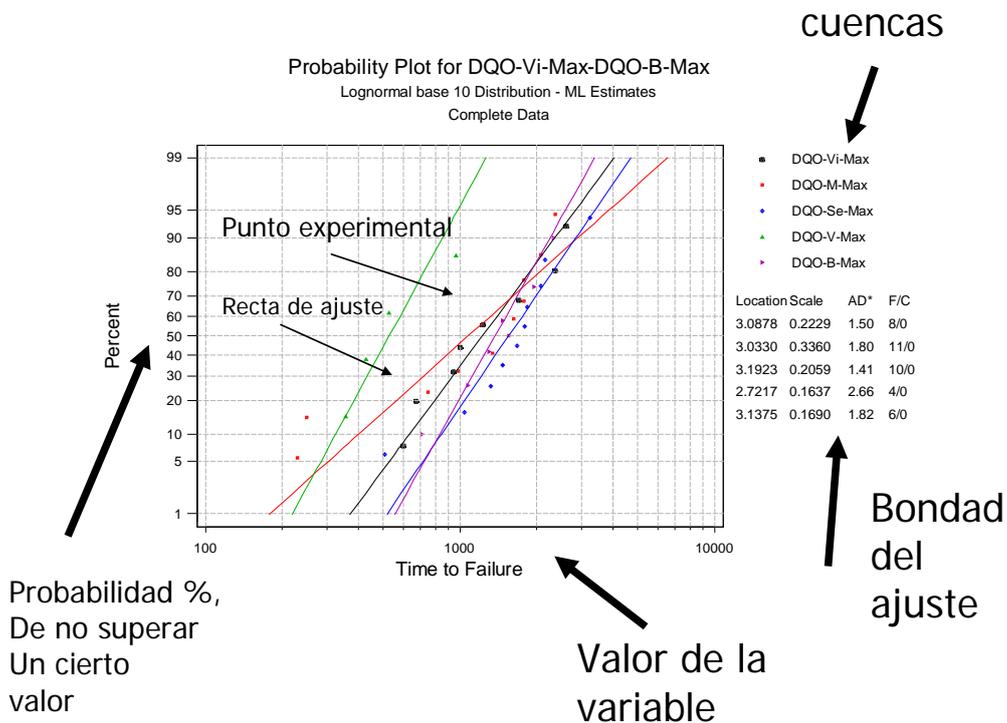


Figura 6.- Curvas de probabilidad acumulada para todas las diferentes cuencas PROMEDSU para concentraciones máximas de DQO.

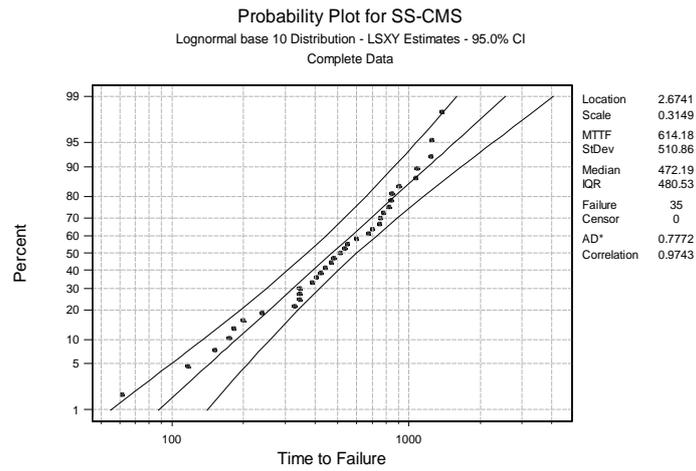


Figura 7.- Curva de probabilidad acumulada para todas la cuencas PROMEDSU para CMS de SS.

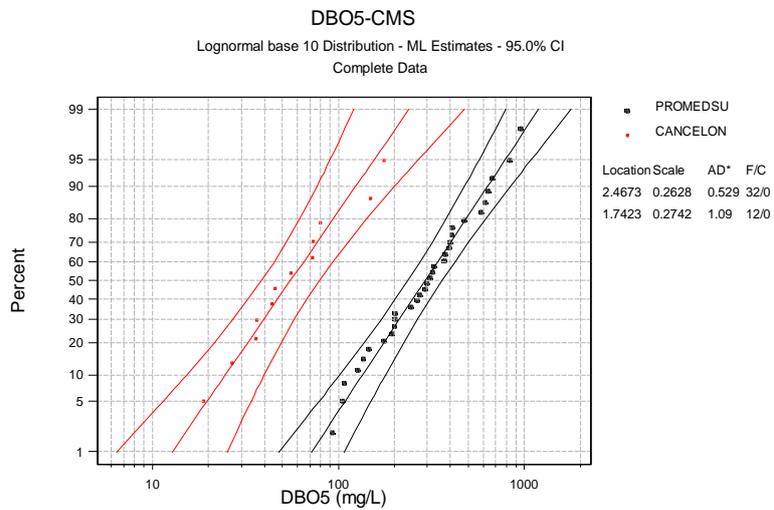


Figura 8.- Distribución log-normal para la CMS de DBO₅.

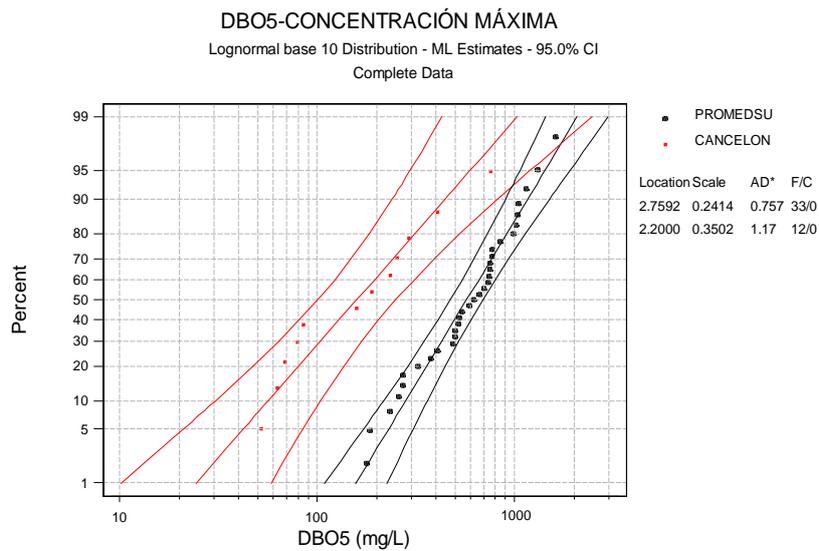


Figura 9.- Distribución log-normal para la concentración máxima de DBO₅.

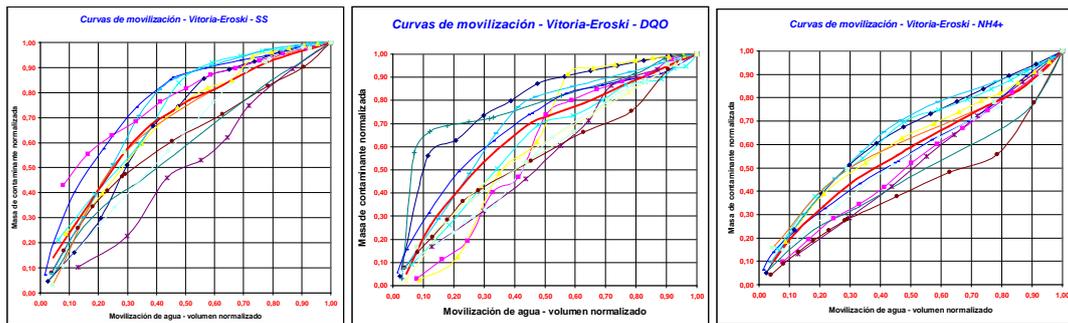


Figura 10.- Curvas de movilización de sólidos en suspensión, DQO y $N-NH_4^+$ en la subcuenca “Eroski” de Vitoria (PROMEDSU).

4.- Contaminación de las aguas residuales en tiempo seco

4.1.- Dotaciones per cápita y concentraciones medias

La contaminación de las aguas residuales urbanas procede, fundamentalmente, de las aguas residuales domésticas y de las aguas residuales industriales.

Los excrementos humanos son responsables de una gran parte de la contaminación de las aguas residuales urbanas. Los adultos producen del orden de 200 a 300 g de heces al día y del orden de 1 a 3 kg de orina al día. Las heces representan del orden de 25 a 30 g/hab.día de DBO_5 y la orina del orden de 10 g de DBO_5 /hab·día, que representan el 60% de los compuestos orgánicos que aparecen en las aguas residuales. También los excrementos son una fuente importante de nutrientes. El 94% del nitrógeno orgánico del agua residual procede de ellos. De ese porcentaje el 50% proviene de la orina (urea), que rápidamente se convierte por vía aerobia o anaerobia en nitrógeno amoniacal. Como ya se ha dicho anteriormente, aproximadamente el 50% del agua residual procede de origen humano.

Para estimar la concentración de los principales componentes de las aguas residuales urbanas se suele utilizar una dotación de contaminante. Las unidades de estas dotaciones son gramos por habitante y día (g/hab·día) de contaminante.

En aguas residuales urbanas, sin una gran incidencia industrial, se pueden adoptar las siguientes dotaciones de contaminación de DBO_5 y SS, expresadas en g/hab.día:

Tabla 5.- Aporte de DBO_5 y SS según el tipo de red y de población

		DBO_5	SS
RED SEPARATIVA	Zona residencial	50	50
	Núcleo de población	60	75
RED UNITARIA	Núcleo de población	75	90

La tabla anterior relaciona el aporte de contaminación con el tipo de alcantarillado y de población. Se deduce de la tabla que una zona residencial generará aguas residuales poco cargadas, ya que se consume más agua y se aporta menos contaminación.

No siempre se relaciona la contaminación doméstica con el tipo de red de saneamiento o el tamaño o tipo de población. En la bibliografía también se pueden encontrar referencias que permiten, por ejemplo, diferenciar el aporte de sólidos orgánicos e inorgánicos. Es el caso de las siguientes referencias que se presentan en las tablas:

Tabla 6.- Aporte diario per cápita de sólidos y DBO₅ en las aguas residuales domésticas (en gramos) (CEDEX, 2006)

Estado de los sólidos	Inorgánicos	Orgánicos	Totales	DBO ₅	
				Imhoff	Fair-Geyer
En suspensión	25	65	90	42	41
Sedimentables	15	39	54	19	16
No sedimentables	10	26	36	23	25
Disueltos	80	80	160	12	16
Totales	105	145	250	54	57

Tabla 3.- Nitrógeno y fósforo aportado por habitante y día en las aguas residuales (CEDEX, 2006)

PARÁMETRO	DOTACIÓN (g/hab·día)
Nitrógeno amoniacal	3 a 10
NTK (Nitrógeno método Kjeldahl)	6.5 a 13
Fósforo (PO ₄ ⁻)	4 a 8
Detergentes	7 a 12

La variación de la composición de las aguas residuales domésticas y urbanas según el lugar y en el tiempo, se debe en cierta medida a las variaciones en las cantidades eliminadas de sustancias, pero la principal razón estriba en la variación del consumo de agua, y en las infiltraciones o fugas en la red de alcantarillado.

En la tabla siguiente se presenta la composición o concentración de las aguas residuales urbanas.

Tabla 7.- Composición típica de agua residual doméstica bruta (Metcalf-Eddy, 1985)
(todas la unidades en mg/L menos los Sólidos Sedimentables)

CONSTITUYENTE	CONCENTRACIÓN		
	FUERTE	MEDIA	DÉBIL
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
Disueltos (SD)	850	500	250
SD fijos (SDF)	525	300	145
SD volátiles (SDV)	325	200	105
En Suspensión (SS)	350	220	100
SS fijos SSF	75	55	20
SS volátiles SSV	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)	20	10	5
DBO₅	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITRÓGENO (total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
FÓSFORO (total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (como CO₃Ca)	200	100	50
GRASA	150	100	50

El Manual de Tratamiento de Aguas de PRIDESA (1995) presenta la tabla siguiente sobre las características de aguas residuales urbanas en España:

Tabla 8.- Características de un agua residual urbana tipo (PRIDESA, 1995)

Parámetro	Unidad	
SS total	mg/L	370
• SS sedimentable (60.5 % de SS total)		
Degradable orgánica	mg/L	112
Inerte orgánica	mg/L	45
Mineral	mg/L	67
Total MS sedimentable	mg/L	224
• SS coloidal (39.5 % de SS total)		
Degradable orgánica	mg/L	73
Inerte orgánica	mg/L	24
Mineral	mg/L	44
Total MS coloidal	mg/L	140
DBO₅ total		
• DBO ₅ disuelta (45 %)		
Degradación rápida	mg/L	66
Degradación lenta	mg/L	69
Total DBO ₅ disuelta	mg/L	135
• DBO ₅ suspendida (55 %)		
DBO ₅ sedimentable	mg/L	100
DBO ₅ coloidal	mg/L	65
Total DBO ₅ suspendida	mg/L	165
NTK agua bruta	mg/L	60
NTK agua decantada	mg/L	54
P agua bruta	mg/L	14-15
P agua decantada	mg/L	12
<i>SS : materia suspendida o sólidos en suspensión</i>		

La tabla siguiente presenta los valores típicos de metales pesados en un agua residual urbana.

Tabla 9.- Contenido en metales típico de aguas residuales domésticas (Henze, 1995)

Parámetros	Unidades ($mg/m^3 = \mu g/L = ppb$)	Tipo de agua residual			
		Concentrada	Moderada	Diluida	Muy diluida
Aluminio	mg Al /m ³	1000	650	400	250
Cadmio	mg Cd /m ³	4	2	2	1
Cromo	mg Cr /m ³	40	25	15	10
Cobre	mg Cu /m ³	100	70	40	30
Hierro	mg Fe /m ³	1500	1000	600	400
Plomo	mg Pb /m ³	80	65	30	25
Manganeso	mg Mn /m ³	150	100	60	40
Mercurio	mg Hg /m ³	3	2	1	1
Niquel	mg Ni /m ³	40	25	15	10
Plata	mg Ag /m ³	10	7	4	3
Zinc	mg Zn /m ³	300	200	130	80

4.2.- Variación temporal de la contaminación de las aguas residuales

A partir de los valores de cargas por habitante y día de diferentes contaminantes presentados anteriormente es posible calcular, junto con los valores de dotaciones de abastecimiento por habitante y día, las concentraciones medias de los mismos. Sin embargo, a lo largo del día, al igual que lo hacen los caudales, las concentraciones de contaminantes de un agua residual urbana varían. Siguen una curva similar a la que

describe la variación de caudales, con puntas casi simultáneas. Son habituales, por ejemplo, coeficientes punta de valor 1.5 en las concentraciones de DBO₅ y de nitrógeno amoniacal.

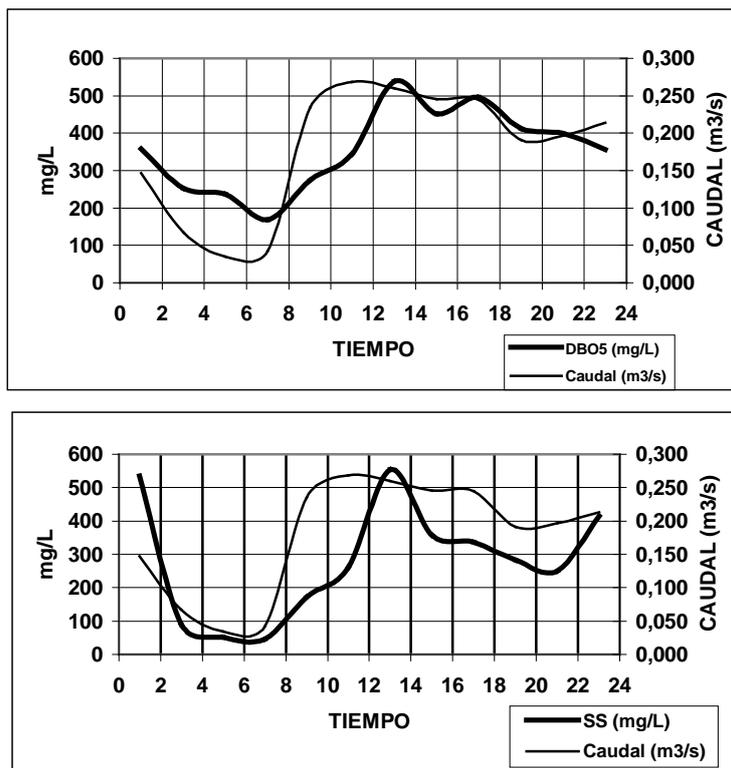


Figura 11.- Evolución diaria de caudales y de concentraciones de SS en la cuenca Triana-Los Remedios (18000 habitantes) de Sevilla.

El análisis de este tipo de curvas de variación de contaminación a lo largo del día permiten detectar la posible presencia de vertidos industriales con alta carga. Se pueden detectar ciclos productivos analizando las variaciones día-noche, o las variaciones entre días laborables y días festivos.

Este tipo de estudios también permite detectar posibles problemas en los rendimientos de procesos biológicos con bajos tiempos de retención, por ejemplo los de alta carga, que si se han diseñado para valores medios de DBO₅, puede que en determinadas horas del día no alcancen los rendimientos esperados. El análisis de las puntas de nitrógeno amoniacal también deben ser estudiadas porque tienen una gran importancia en el diseño de los procesos de nitrificación de aguas residuales.

5.- El origen de la contaminación movilizada en una red unitaria en tiempo de lluvia

Las curvas anteriormente presentadas, que describen la variación de la concentración de contaminantes a lo largo del día, son fundamentales para discernir, cuando se estudia un polutograma en tiempo de lluvia, qué contaminación procede de las aguas residuales de tiempo seco y qué masa procede de otras fuentes. Estas otras fuentes serían, fundamentalmente, la contaminación procedente de la superficie de la cuenca y la contaminación procedente de sedimentos y fangos depositados en la red de alcantarillado.

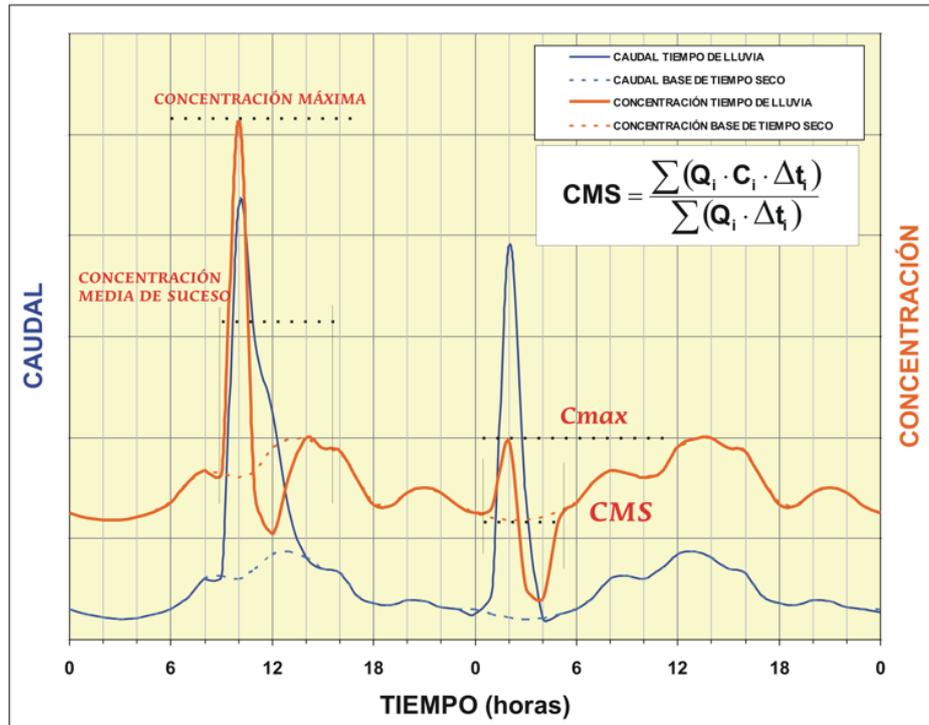


Figura 12.- Diagrama que muestra la modificación del hidrograma y polutograma de tiempo seco por la entrada de escorrentía de lluvia en el sistema de alcantarillado.

Tabla 10.- Balance de masas de los diferentes contaminantes en el “Suceso Sevilla 3”.

PARÁMETROS EN INTERVALO DE MUESTREO

CAUDALES (m³/s)

MÍNIMO	0.114
MÁXIMO	0.496
MEDIO	0.279
COEF. PUNTA (Q _{max} /Q _{mir})	4.359

VOLÚMENES (m³)

TOTAL DEL SUCESO	1749.7
ASIGNADO A TIEMPO SECO	676.1
ASIGNADO A ESCORRENTÍA	1073.5
% ESCORRENTÍA/ TOTAL	0.6

	CONCENTRACIONES				MASAS TOTALES			
	[] MAX	[] MIN	[] MED	CMS	REGIST.	T. SECO	ESCORR.	M.esc./M.total
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Kg	Kg	Kg	%
DQO	1472.0	286.0		977.0	1709.4	182.9	1526.5	0.89
DBO5	592.5	138.0		401.5	702.5	84.5	618.0	0.88
COT	102.5	19.4		57.7	100.9	12.1	88.9	0.88
NTK	94.2	36.9		54.5	95.3	27.0	68.2	0.72
NH4+	37.9	15.4		23.0	40.3	13.5	26.8	0.66
P-total	8.9	8.9		8.9	15.6	7.0	8.6	0.55
SS	1335.3	153.0		851.4	1489.7	72.0	1417.7	0.95
SSV	929.4	111.0		594.0	1039.3	86.7	952.6	0.92
SD	580.0	60.0		237.0	414.7	67.6	347.1	0.84
SDV	450.0	16.0		103.3	180.8	16.9	163.8	0.91
ST	1689.1	323.0		1088.4	1904.4	139.6	1764.8	0.93
Turbidez	344.0	61.5	228.5	----	----	----	----	----
Cond.	0.7	0.4	0.5	----	----	----	----	----
Temp	22.9	19.0	20.7	----	----	----	----	----
pH	8.6	6.9	7.5	----	----	----	----	----
Cu (dis)	0.017	0.017		0.017	0.030	0.015	0.015	0.50
Zn (dis)	0.034	0.034		0.034	0.059	0.054	0.005	0.09
Pb (dis)	0.660	0.660		0.660	1.155	0.007	1.147	0.99
HC (dis)	7.400	2.130		5.177	9.058	1.014	8.044	0.89

ECUACIÓN DE ACUMULACIÓN
f (USO DE CUENCA, DÍAS DE TIEMPO SECO PRECEDENTE, HÁBITOS DE LIMPIEZA)

ECUACIÓN DE LAVADO
f (INTENSIDAD DE LA LLUVIA, TIPO DE PARTÍCULAS, MOMENTO DEL AGUACERO, CONSTANTE ESPECÍFICA)

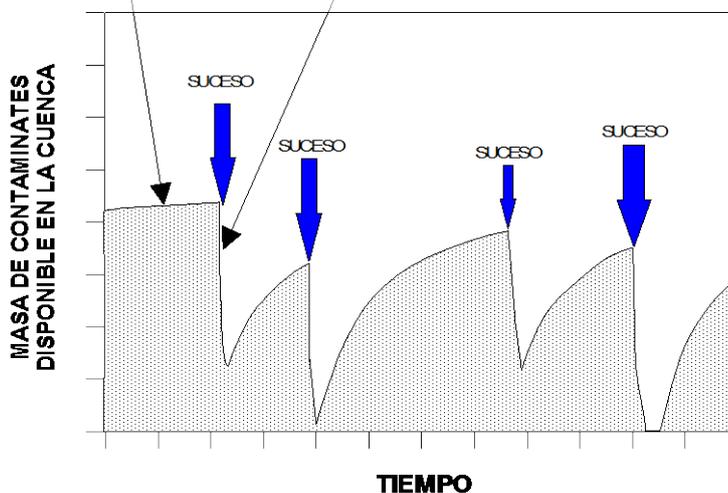


Figura 13.- Esquema simplificado que muestra el proceso de acumulación y de lavado de la contaminación de una cuenca.

5.1.- La contaminación originada en la superficie de las cuencas

En general, las fuentes de contaminación pueden ser clasificadas en dos categorías: fuentes puntuales y fuentes difusas. Se habla de fuentes puntuales cuando la contaminación es aportada al medio través de un colector o canal en un lugar concreto; son vertidos de fácil localización y su origen puede ser determinado relativamente bien. Las fuentes difusas, o no localizables, son aquellas cuya contaminación se origina, y se encuentra dispersa, en zonas muy extensas y su control es muy difícil, ya sea en su origen o en su acceso a los sistemas acuáticos.

Una fuente clara de aporte de contaminación a los sistemas acuáticos es la escorrentía superficial. La concentración de actividades humanas genera deposición de polvo, suciedad, arenas, materia orgánica, nutrientes, metales pesados, tóxicos y contaminación bacteriológica sobre las superficies de las cuencas. La escorrentía, generada a partir de los sucesos de lluvia, disuelve y arrastra estos materiales vertiéndolos, en última instancia, en el medio receptor. Evidentemente, como consecuencia de las diferentes actividades y usos que se realizan en ellas, una cuenca natural, una cuenca rural, una cuenca urbana o una cuenca industrial, tendrán aguas de escorrentía con muy diferentes tipos y cargas de contaminación.

Son muy diversas las causas de la contaminación de la escorrentía superficial urbana. La lluvia y la nieve atrapan contaminantes presentes en la atmósfera en su caída; una primera fracción de la misma se emplea en mojar las superficies, otra se evapora y otra queda atrapada en huecos y depresiones del terreno. Si sigue lloviendo el agua se moviliza hacia los puntos de recogida, drenando las superficies y, a su vez, limpiando y transportando en disolución o en suspensión los contaminantes acumulados hacia la red de saneamiento.

5.1.1.- Fuentes de contaminación de la escorrentía urbana

El primer intento serio de identificar las fuentes de contaminación de la escorrentía urbana fue en el trabajo de la “*American Public Works Association*”, realizado en la ciudad de Chicago en 1969. El objetivo del estudio fue el identificar y cuantificar las fuentes de contaminación de la escorrentía urbana. Las conclusiones fueron que las principales fuentes eran los sedimentos y materias acumuladas en la superficie de las calles, contaminantes de las zonas verdes, sustancias depositas por el viento, las sustancias químicas empleadas para derretir el hielo y las sustancias lavadas de los vehículos. El estudio también indicaba que la fracción acumulada en las calles era la más importante en términos cuantitativos y, además, la más fácil de gestionar o reducir.

En 1972, el estudio de la EPA (la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.) “*Water Pollution Aspects of Street Contaminants*”, de Sartor y Boyd, se convirtió en el marco de referencia de las investigaciones relacionadas con la contaminación de las aguas de escorrentía urbana. En el estudio se tomaron muestras de la acumulación de sólidos totales en las calles de 8 ciudades estadounidenses, caracterizando sus propiedades físicas y químicas.

A continuación se presentan las fuentes de contaminación de la escorrentía urbana en función de su origen.

Contaminación atmosférica

Los contaminantes presentes en la atmósfera, de una forma u otra, son atrapados por la lluvia en su caída y transportados por la escorrentía por las superficies impermeables. En la tabla siguiente se recoge la variabilidad de la calidad del agua de lluvia en función del uso del área en donde se recoge la precipitación.

Tabla 11.- Contaminación del agua de lluvia (Thomas, 1993).

PARÁMETRO	ZONA RURAL	ZONA URBANA	ZONA INDUSTRIAL
pH	6.9	6.8	6.7
Conductividad (µS/cm)	25	30	20
Turbidez (NTU)	0.2	0.2	0.8
SS (mg/L)	2.0	3.0	6.0
CF (UFC/100 mL)	0.0	0.0	0.0
Nitratos (mg/L)	0.23	0.21	0.05
Zinc (mg/L)	0.0	0.0	0.5
Plomo (mg/L)	0.0	0.0	0.0

El empleo del plomo en el combustible de los automóviles puede ocasionar que en el agua de lluvia de las ciudades se alcancen concentraciones de aproximadamente 1 mg Pb/m³. Este valor puede estar actualmente sobrestimado ya que las normativas ambientales vigentes tienden hacia la reducción de las emisiones de este compuesto.

En las tablas siguientes se recogen valores medios de las cargas específicas de los contaminantes más importantes hallados en la campaña del NURP (*National Urban Runoff Program*, EE.UU.)

Tabla 12.- Media anual de contaminación atmosférica depositada en Washington (kg/ha/año).
(MWWCOG, 1983).

Contaminante	Zona rural	Zona suburbana	Zona urbana
ST	110.88	173.6	274.4
DQO	222.88	148.96	235.2
NT	22.288	14.336	19.04
NO ₃ ⁻ -N (nitratos)	10.528	6.272	7.616
NH ₃ -N (amonio)	6.16	1.232	1.12
NTK	11.76	8.064	11.424
P _{total}	0.7952	0.56	0.9408
Orto-P	0.3136	0.2912	0.392
Cd	-	0.1008	0.00336
Cu	-	0.2352	0.6832
Pb	0.0672	0.4928	0.5936
Fe	-	1.7584	6.272
Zn	0.7504	1.512	0.728

Contaminación presente en la superficie de la cuenca

Las fuentes más importantes de contaminación difusa en la superficie de la cuenca son las siguientes:

i. Residuos animales:

Todos los animales que viven en las zonas urbanas, de una u otra manera, generan residuos que, por lo general, se depositan en las calles, plazas, y aceras. Al llover, las superficies son lavadas y la escorrentía arrastra estos residuos, transportándolos al sistema de drenaje. Los residuos de animales aportan bacterias, virus, y gran cantidad de nutrientes a las aguas de escorrentía. Los microorganismos pueden incluir patógenos causantes enfermedades antrópicas. Según el NURP (EPA, 1983), las aguas de escorrentía urbana contienen entre 10⁴ y 10⁵ UFC/100 mL.

ii. Basura y residuos:

Las zonas urbanas se caracterizan por ser fuentes de producción a gran escala de residuos sólidos. Las actividades diarias de las ciudades ocasionan el depósito sobre las superficies de las calles de materiales como papeles, cartones, residuos textiles, madera, goma, vegetales, hojas, colillas, botellas y vidrios rotos, latas, plásticos, y polvo en general. Una vez depositados, por un proceso de degradación física y/o química, dichos residuos se disgregan y su transporte por las aguas de escorrentía se ve facilitado.

iii. Tráfico rodado:

El plomo y el zinc son los metales pesados más abundantes en la escorrentía urbana. Chistensen, en 1979, demostró que el zinc presente en los neumáticos de los vehículos es una significativa fuente de este metal en la escorrentía urbana. Otras fuentes menos importantes son el desgaste de frenos y las emisiones de los motores. El plomo se asocia principalmente a las emisiones de los vehículos y está fuertemente vinculado a las partículas finas. Otras fuentes de contaminación debidas al tráfico son el goteo y fugas de aceites y lubricantes, y del uso y deterioro de los vehículos pueden generarse también residuos de plástico y vidrio. Otros metales como el hierro, el bario o el cesio están asociados también a las partículas de desgaste de frenos. Hontoria, 1985, indica que en zonas habituales de frenada, como un semáforo, la concentración de cinc es hasta 9 veces superior a lo normal.

En la figura siguiente se presentan los compuestos más generados por el tráfico rodado:

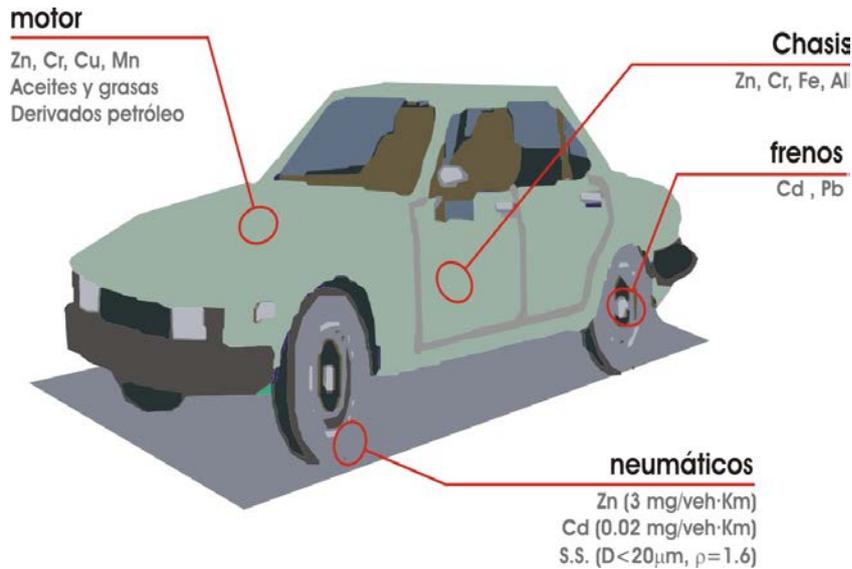


Figura 14.- Contaminación generada por el tráfico rodado (adaptado de Sansalone y Brukbedger, 1997)

iv. Erosión de los pavimentos:

Los pavimentos son fuente de materiales, que desde el punto de vista de la escorrentía son contaminantes. Algunas de las partículas que tienen su origen en los pavimentos son agregados de varios materiales. El mayor o menor aporte de carga contaminantes depende de factores tales como la edad y estado de conservación de los pavimentos, las condiciones climáticas locales o el derrame de disolventes.

v. Desgaste de fachadas y la corrosión de cubiertas y tejados:

La acción erosiva de los agentes atmosféricos provoca el deterioro de fachadas y tejados. Las partículas que se desprenden pueden ser arrastradas por la escorrentía. En la tabla siguiente se presentan los valores de cobre, plomo y zinc encontrados en la escorrentía de tejados de tres cuencas de Winsconsin (EE.UU).

vi.- Actividades agrícolas y de jardinería:

En el cinturón que rodea las ciudades es posible observar terrenos dedicados a prácticas agrícolas e inclusive pecuarias. Por otra parte, los jardines y parques de nuestras ciudades representan actividades agrícolas dentro de los núcleos urbanos. En dichos terrenos se utilizan fertilizantes, pesticidas y herbicidas que también pueden ser lavados por la escorrentía en episodios de lluvia.

vi. Uso de sal para el deshielo de la nieve:

El deshielo de la nieve es un mecanismo adicional que genera aguas de escorrentía. A pesar de que los caudales que se generan de este fenómeno son bajos, estos permanecen en el tiempo durante varios días y eliminan una fracción significativa de los contaminantes depositados en las superficies. Los principales contaminantes que pueden acompañar a la nieve son los cloruros y el plomo. En las calles y carreteras se pueden alcanzar concentraciones superiores a 20.000 mg/L de cloruros siendo su rango común entre 1.000 y 10.000 mg/L. Adicionalmente, en la nieve, las concentraciones de plomo oscilan entre 1 a 10 mg/L, y alcanzan valores extremos de 100 mg/L; proceden del combustible de los vehículos. En general el problema de la contaminación por nieve está asociado a la presencia de sólidos en suspensión.

vii. Superficies no protegidas:

En muchas zonas urbanas existen terrenos en donde no existe edificación alguna o simplemente se encuentran abandonados o en espera de una nueva edificación. Por lo general estos suelos están más expuestos a procesos de erosión por el viento o lluvia. Las partículas erosionadas pueden ser arrastradas a zonas hidrológicamente activas durante los sucesos de tormenta y contribuir a la contaminación de las aguas de escorrentía urbana.

viii. Terrenos con obras:

La cantidad de sedimentos en los vertidos de aguas de tormenta que proceden de zonas con terrenos en construcción pueden variar considerablemente. Estudios recientes han demostrado que en dichas zonas las cargas de sedimentos pueden ser del orden de 85 a 110 tm/ha/año. Los sedimentos en las aguas de escorrentía de terrenos en obras de edificación son generalmente de 10 a 20 veces de aquellos que se generan en terrenos agrícolas, y de 1000 a 2000 veces aquellos que ocurren en zonas forestales. En un periodo de tiempo pequeño estos terrenos pueden contribuir con más sedimentos a los medios receptores que los que normalmente ocurrirían en varias décadas (ASCE, 1992). El polvo generado en estos terrenos, por lo general, suele estar acompañado de aceites y lubricantes de la maquinaria utilizada en la construcción; también pueden estar presentes residuos de la corrosión de materiales y lixiviados de la basura.

5.1.2.- Características de la contaminación presente en la superficie de las cuencas

Como ya se ha indicado, el trabajo de Sartor y Boyd de 1972 puede considerarse como el punto de partida de las investigaciones relacionadas con la contaminación de las aguas de escorrentía urbana. Las conclusiones más importantes relativas a las características de los sedimentos acumulados en calles fueron las siguientes:

- Los sedimentos están fuertemente contaminados con sustancias que aparecen en la escorrentía urbana.
- Los sedimentos se pueden considerar como la fuente principal de contaminación de las aguas de escorrentía en los entornos urbanos.
- Su componente principal es inorgánica, con características similares a las arenas y limos.
- La mayor parte de los contaminantes están asociados con las fracciones más finas. Aunque la proporción de materiales inferiores a 43 micras supone un porcentaje muy pequeño de toda la masa movilizada, como puede apreciarse en la tabla siguiente, contienen alrededor del 50% de metales.
- Los contaminantes no se distribuyen uniformemente a lo largo de las calles, sino que tienden a concentrarse en zonas determinadas. Debido a las turbulencias generadas por el viento y las inducidas por el tráfico conducen las partículas a ciertas zonas con baja circulación. La influencia de las cunetas o medianas, o la de los coches estacionados provoca concentraciones de polvo y suciedad en estas zonas.

Tabla 13.- Contaminación asociada con polvo y suciedad en cuencas drenantes (Novotny and Chesters, 1991).

Contaminante	Ref.	Residencial (mg/g)	Industrial (mg/g)	Comercial (mg/g)	Autopistas (mg/g)
DBO ₅	2	9.19	7.50	8.33	2.3
DQO	2	20.82	35.71	19.44	54
Sólidos volátiles	2	71.67	53.57	77.00	51
NTK	2	1.666	1.392	1.111	0.156
PO ₄ -P	2	0.916	1.214	0.833	0.61
NO ₃ -N	3	0.050	0.064	0.500	0.079
Pb	3	1.468	1.339	3.924	12
Cr	3	0.186	0.208	0.241	0.08
Cu	3	0.095	0.055	0.126	0.12
Ni	3	0.022	0.059	0.059	0.19
Zn	3	0.397	0.283	0.506	1.5
CT (UFC/100 mL)	2	160.000	82.000	110.000	-
CF (UFC/100 mL)	2	16.000	4.000	5.900	925

2) Sartor et al., 1974 3) Amy, et al., 1975

Cano y Tejero (1996) midieron en una cuenca urbana de Santander los valores que se presentan a continuación. Se puede observar que, en general, los valores son muy parecidos a los que se presentan en la tabla anterior.

Tabla 14.- Fracciones de diferentes contaminantes presentes en el polvo y suciedad acumulados en una cuenca urbana de Santander (Cano, 1996).

Contaminante	Media	Rango
Polvo y suciedad (Kg/Km cuenta/día)	35	25-42
DBO ₅ (mg/g)	3.32	
DQO (mg/g)	50.06	45.92 – 54.55
N-NH ₄ ⁺ (mg/g)	0.003	0.001 – 0.006
NO ₃ ⁻ -N (mg/g)	0.005	0.0049 – 0.0052
NO ₂ ⁻ -N (mg/g)	0.0009	0.0002 – 0.0013
PO ₄ ⁻ -P (mg/g)	0.083	0.060 – 0.115
CT (UFC/gramo)	2.5*10 ⁶	

Las cargas anteriores son lavadas por las aguas pluviales, con toda la variabilidad intrínseca a las lluvias, y generan flujos con contaminación muy variada. En la tabla siguiente se presentan varias referencias que muestran los valores de concentraciones de contaminantes presentes en aguas de escorrentía superficial.

Tabla 15.- Características de la contaminación de aguas de escorrentía. Rangos y CMS (Anta et al, 2004)

PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	FONTIÑAS (Santiago de Compostela)	CANADÁ Marsalek (1989)	GRAN BRETAÑA Ellis (1989)	Novotny (1994)	NURP - USA (1983)	Metcalf-Eddy (1991)
CONTAMINANTE	ZONA RESIDENCIAL	USO MIXTO DEL SUELO	USO MIXTO DEL SUELO		USO MIXTO DEL SUELO	
SS (mg/L)	50 – 590 (219)	----	21 - 2582 (190)	3 - 11000 (650)	100 [1.0 - 2.0]	67 - 101
DQO (mg/L)	26 – 180 (89)	86 – 119	20 – 365 (85)		65 [0.5 – 1]	40 -73
DBO ₅ (mg/L)	22 – 95 (50)		7 – 22 (11)	10 – 250 (30)	9 [1 – 2]	8 – 10
Plomo (mg/L)	0.013 – 0.28 (0.058)	0.146	0.01 - 3.1 (0.21)	0.03 - 3.1 (0.3)	0.14 [0.5 - 1.0]	0.27 - 0.33
Zinc (mg/L)	0.136 -0.432 (0.225)	0.490	0.01 - 3.68 (0.30)	----	0.16 [0.5 - 1.0]	0.135 - 0.226
Cobre (mg/L)	0.035 – 0.159 (0.079)	----	----	----	0.043	----

*() Valores medios [] Coeficientes de variación.

5.2.- La contaminación asociada a los depósitos de la red de alcantarillado

5.2.1.- Introducción

En la última década se ha realizado una importante producción científica relacionada con los sedimentos y la problemática asociada a la modelización del transporte, acumulación y erosión de los mismos.

Existe una gran variabilidad en los sedimentos que se pueden encontrar en las redes de saneamiento. Aparecen desde pequeñas, y poco densas, partículas que se transportan en suspensión y, aunque no interfieren de un modo apreciable en la capacidad hidráulica, si pueden llevar asociadas una importante carga de contaminación. También aparecen partículas con una baja velocidad de sedimentación que se depositan únicamente durante períodos de tiempo seco, y partículas grandes y pesadas que forman parte del lecho de las conducciones de un modo cuasi-permante, y que se movilizan en episodios con flujos muy energéticos.

La presencia de sedimentos en la red de saneamiento provoca una serie efectos con consecuencias en el funcionamiento de la propia red y también, en última instancia, en el medio receptor. Tres son los efectos principales, (Acker *et al*, 1996 y Butler y Davies, 2000):

- *Obstrucciones en la red:*

La acumulación de sedimentos en puntos determinados de la red provoca una reducción de la sección. Esta reducción tiene como consecuencia una pérdida de capacidad de desagüe de modo que para algunos caudales se pueden generar condiciones de flujo a presión. En este momento se produce una situación de equilibrio si existe suficiente gradiente hidráulico para que la tasa de sedimento entrante sea igual a la saliente. Sino, la tubería terminará por bloquearse, situación que puede propiciar inundaciones en la superficie de la cuenca.

- *Pérdida de sección y de capacidad hidráulica de la red:*

La capacidad de desagüe de un alcantarillado se ve reducida debido a la pérdida de energía por el transporte de sedimentos. Ensayos en laboratorio indican que para tuberías sintéticas se reduce hasta un 7% mientras que para tuberías rugosas –hormigón o fundición- hasta un 2%. Estos valores son válidos si toda la carga de sedimentos se transporta en suspensión. Si existen depósitos de sedimentos las pérdidas de energía asociadas a mantenerlos en movimiento son menores, pero la combinación de pérdida de sección transversal y el incremento de rugosidad por la textura del fondo reducen la capacidad hidráulica de la red de un modo notable.

- *Son vectores de transporte o almacenamiento de contaminantes:*

Cuando se producen los reboses de los sistemas de alcantarillado unitario, además de la contaminación propia de la escorrentía superficial urbana, se vierte al medio receptor contaminación de las aguas residuales urbanas de tiempo seco y también parte de los sedimentos depositados en las conducciones durante el tiempo seco y durante las ramas de descenso de los hidrogramas asociados a los aguaceros.

La importancia del fenómeno de resuspensión de los sedimentos ha sido estudiado por diversos autores. En la tabla siguiente se presenta el balance de masas de contaminantes en varias redes de saneamiento europeas, fundamentalmente unitarias.

Tabla 16.- Contribución a la contaminación movilizada por los sucesos de lluvia en varias cuencas europeas (Gromaire *et al.*, 2001).

PARÁMETRO	Referencia	FUENTE DE CONTAMINACIÓN		
		Aguas residuales urbanas	Escorrentía superficial	Sedimentos de las conducciones
SS	Gromaire <i>et al.</i> (2001)	21%	15%	64%
	Krejci <i>et al.</i> (1987)	6%	35%	59% (20% biopelícula y 39% sedimentos)
	Bachoc (1992)	N/D	N/D	33% - 44%
	Chebbo (1992)	20%	56%	24%
DQO	Gromaire <i>et al.</i> (2001)	34%	15%	51%
	Krejci <i>et al.</i> (1987)	20%	22%	58% (23% biopelícula y 35% sedimentos)
	Chebbo (1992)	33%	45%	22%

En primer lugar se recogen los resultados del grupo de investigación del CERREVE francés (“École Nationale des Pontes et Chaussées”) en la cuenca urbana de Le Marais (París, 42 ha, residencial). Gromaire *et al.* indican que la resuspensión de sedimentos en las conducciones contribuye aproximadamente entre un 40% y un 80% a la carga total de SS y SSV, entre un 30% y un 80% de las cargas de DBO₅, y entre un 25% y un 70% a las cargas de DQO. La contribución es fundamentalmente en carga particulada.

Los valores que aparecen en la bibliografía presentan una gran variabilidad que depende fundamentalmente del uso y tamaño de las cuencas. Además, la contribución de los sólidos resuspendidos

se focaliza en los tramos más altos de las redes de alcantarillado, donde las velocidades del flujo son más bajas y existen, por tanto, más posibilidades de que se forme un lecho de sedimentos permanente.

5.2.2.- Características de los sedimentos encontrados en las redes de alcantarillado

La caracterización de los sedimentos es compleja. Los motivos más importantes son las condiciones locales de cada cuenca (por ejemplo la naturaleza del suelo, la existencia de distintos tipos de imbornales, las técnicas municipales de limpieza,...) y la variabilidad espacial y temporal de los propios sedimentos. En la caracterización también influye la técnica de muestreo y su nivel de incertidumbre.

Un estudio de referencia en la caracterización de los sedimentos depositados en las tuberías fue desarrollado por Crabtree en el año 1989, en redes de saneamiento en Gran Bretaña (Ackers et al, 1996, Butler y Davies, 2002; Ashley et al, 2003; Butler et al, 2003,...). Crabtree propuso que la naturaleza, origen y localización de los sedimentos podía clasificarse en cinco grupos, A-E. La disposición típica en las tuberías se presenta en la figura siguiente.

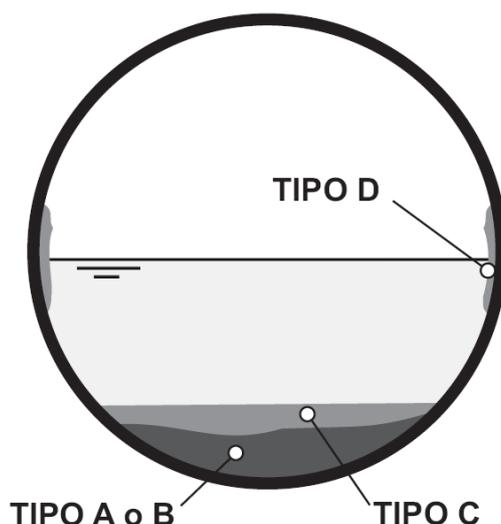


Figura 15.- Depósitos típicos de sedimentos en las redes de saneamiento (Crabtree, 1989).

El material de tipo A es el más granular y se encuentra típicamente en el fondo de las tuberías. Estos depósitos tienen, normalmente, una densidad superior a 1800 kg/m^3 , con un contenido de materia orgánica inferior al 7%. El material tipo C es más fino, con un contenido en materia orgánica de un 50% y una densidad de 1200 kg/m^3 . El material tipo E, hallado habitualmente en los estanques de retención de la escorrentía, es el más fino de todos. En la siguiente tabla se resumen las características de los distintos grupos.

Tabla 17.- Características de los depósitos de sedimentos (Crabtree, 1989).

TIPO	Descripción y localización	Porcentaje por tamaño de partícula (mm).			Densidad (kg/m^3)	Contenido en materia orgánica	DQO (g/kg material húmedo)
		50-2	2-0.0063	<0.0063			
A	Material granular. Fondo de tuberías.	33	61	6	1720	7	16.9
B	Como el A pero con características cementantes	--	--	--	--	--	--
C	Capa móvil de material fino. Mezclado o por encima del A/B	0	55	45	1170	50	20.5
D	Biopelículas en el entorno del caudal medio	6	62	32	1210	61	49.8
E	Material fino mineral y orgánico en tanques de RAU's	9	69	22	1460	1.5	23

Los depósitos de tipo A y B están asociados habitualmente a pérdidas de capacidad hidráulica en las redes, siendo los de tipo A la fuente más importante de contaminantes. Los grandes colectores tienen mayor cantidad de material de tipo C mezclado con el A, mientras que las biopelículas son importantes ya que son fácilmente erosionables, afectan a la rugosidad de la tubería y son el material que aporta mayor demanda de oxígeno (Butler y Davies, 2002).

Por último, mencionar que esta clasificación es orientativa y que la composición de los depósitos dependerá del material disponible para el transporte, las condiciones de flujo existentes y las condiciones locales de la cuenca.

Oms et al. (2002) realizaron una cartografía del lecho de sedimentos de la cuenca urbana Le Marais (París) empleando un endoscopio. En los colectores de esta cuenca unitaria observaron que la capa de sedimentos granulares, tipo A, tenía un aspecto negruzco, con partículas de tamaño milimétrico. Por encima de esta capa se dispone una capa inmóvil de material orgánico, con un espesor que oscila entre 2 cm y 15 cm. Los autores señalan que esta capa sólo aparece en zonas donde se cumplen las siguientes condiciones:

- El flujo en tiempo seco es muy lento, con velocidades inferiores a 10 cm/s.
- La pendiente del lecho del colector de hormigón es inferior al 0.05%.
- La capa inferior de sedimentos gruesos genera charcas y remansos.

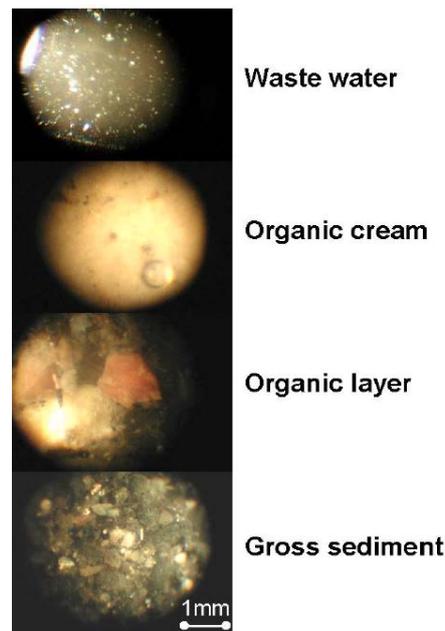


Figura 16.- Fotografía de los sedimentos encontrados en las redes unitarias (Oms et al., 2002).

Otra clasificación muy utilizada a la hora de caracterizar los sedimentos presentes en las redes de alcantarillado es la propuesta en el informe del CIRIA (“Construction Industry Research and Information Association”) titulado “Design of Sewer to Control Sediment Problems” (Ackers et al., 1996). Según ésta, los sedimentos se diferencian en sedimentos fecales, presentes en redes de aguas fecales y unitarias, sedimentos pluviales, presentes en las redes unitarias y separativas de pluviales, al igual que los sedimentos granulares, el último subgrupo de esta clasificación.

Esta clasificación hace referencia al origen de los sedimentos pero también a su modo de transporte, ya que aunque los sedimentos pluviales y granulares se originan en la superficie de la cuenca y no existe una barrera clara entre ambas fracciones; los primeros se transportan en suspensión y los segundos por el fondo. En la tabla siguiente se resumen las características de los distintos tipos de sedimentos.

Tabla 18.- Clasificación de los sedimentos móviles encontrados en las redes de saneamiento (Acker et al, 1996).

Tipo de sedimento	Modo normal de transporte	Tipos de redes en la que se presenta	Parámetro	Carga de sedimentos		
				Baja	Media	Alta
Fecal	Suspensión	Fecales. Unitarias	Conc. (mg/L)	100	350	500
			d50 (µm)	10	40	60
			$v_{\text{específica}}$	1.01	1.4	1.6
Pluvial	Suspensión	Unitarias. Pluviales.	Conc. (mg/L)	50	350	1000
			d50 (µm)	20	60	100
			$v_{\text{específica}}$	1.1	2.0	2.5
Granular	Fondo	Unitarias. Pluviales.	Conc. (mg/L)	10	50	200
			d50 (µm)	300	750	750
			$v_{\text{específica}}$	2.3	2.6	2.6

Los sedimentos fecales son fundamentalmente de naturaleza orgánica, con un porcentaje medio que oscila entre el 65 y el 75%. Poseen una densidad específica baja, inferior a 1.6, y consecuentemente una baja velocidad de sedimentación, con valores habituales en el entorno de 1,5 m/h.

Los sedimentos pluviales tienen una cuarta parte de materia orgánica. Existe mucha dispersión, e incluso contradicciones, en los valores característicos citados en la bibliografía, debido probablemente al origen de los sedimentos. Así, en redes unitarias se habla de densidades específicas inferiores a 1,6, mientras que en redes separativas de pluviales incrementarán hasta 2,5. Como puede apreciarse en la siguiente figura, cerca del 90% es inferior a 100 µm.

Los sedimentos granulares constituyen la mayor parte de los que se encuentran depositados en las redes. Habitualmente se transportan por el fondo, aunque en ciertos episodios muy energéticos pueden transportarse en suspensión. Aunque la diferenciación con los sedimentos pluviales es complicada se suelen definir como la fracción inorgánica superior a 150 µm con densidades específicas cercanas a 2,7.

5.2.3.- Contaminación en tiempo de lluvia en las redes unitarias

A lo largo de este documento se han expuesto las principales fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía, originadas en la superficie de las cuencas drenantes, así como las características de los sedimentos depositados en las conducciones de la red de alcantarillado y de las aguas residuales que circulan en tiempo seco. La red de alcantarillado no es únicamente un sistema para el transporte de las aguas residuales sino que funciona como un reactor con procesos químicos, físicos y biológicos que afectan a la contaminación de los flujos tanto en tiempo seco y de lluvia.

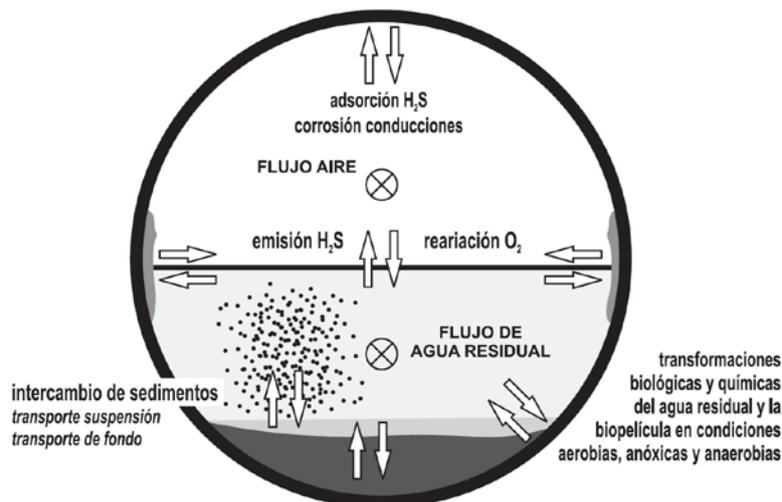


Figura 17.- El colector de aguas residuales como "reactor bio-químico".

En general, durante los episodios de lluvia, la mayor parte de la contaminación movilizada por las redes unitarias tiene su origen en la resuspensión de los sedimentos depositados en las redes de alcantarillado. Así lo indican los trabajos de investigación realizados en Europa sobre esta problemática. A continuación se comenta uno de los más elaborados, ya citado, desarrollado en una cuenca residencial de París.

Gromaire *et al.* (2001) observaron cambios en las características de las aguas que entran en las redes unitarias en tiempo de lluvia, en particular:

- Un incremento en la proporción de contaminantes particulados.
- Incrementos en las concentraciones de sólidos en suspensión, sólidos en suspensión volátiles, DBO₅ y DQO.
- Incremento en la velocidad de sedimentación de los sólidos.
- Un aumento en la proporción de materia orgánica de los sólidos en suspensión.

Durante los episodios de lluvia los sólidos en suspensión son el principal vector de contaminación. Así, en la cuenca *Le Marais* entre el 60% y el 95% de la materia orgánica, el 65% y el 99% del zinc y los hidrocarburos y entre el 90% y el 99% del cadmio, cobre y plomo están asociados a la fracción particulada de la masa movilizada (ver figura siguiente).

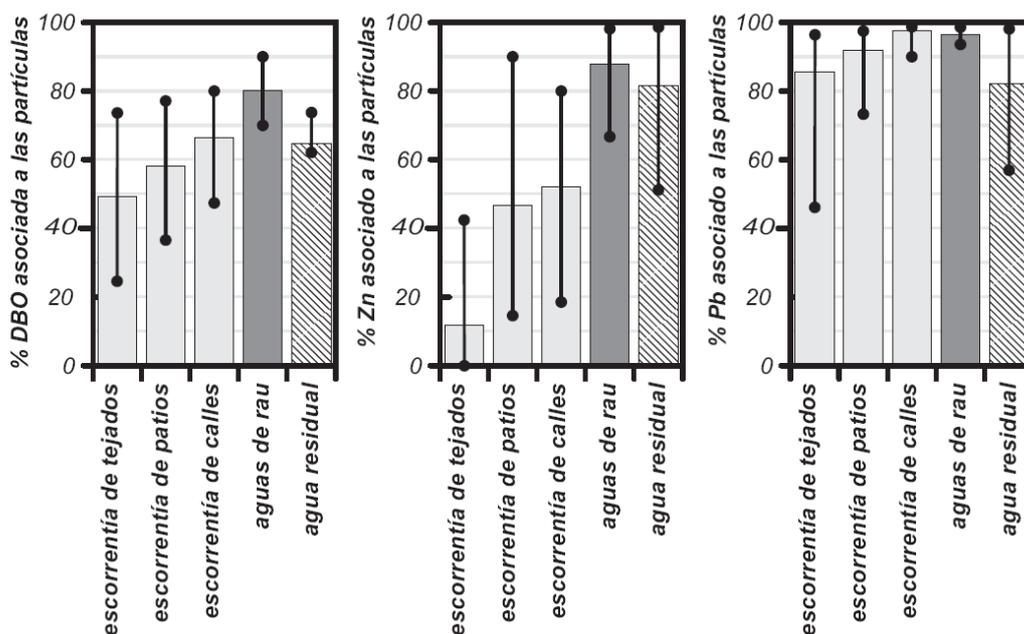


Figura 18.- Porcentaje de DBO5, Zinc y Plomo asociado a la fracción particulada en la cuenca unitaria *Le Marais*, París (Chebbo y Gromaire, 2004).

Además, como ya se ha indicado, las partículas asociadas a las DSU presentan mayores velocidades de sedimentación que las de las partículas asociadas a la escorrentía superficial. Además, estas velocidades son mucho mayores que las de las partículas asociadas a las aguas residuales, como puede comprobarse en la figura siguiente.

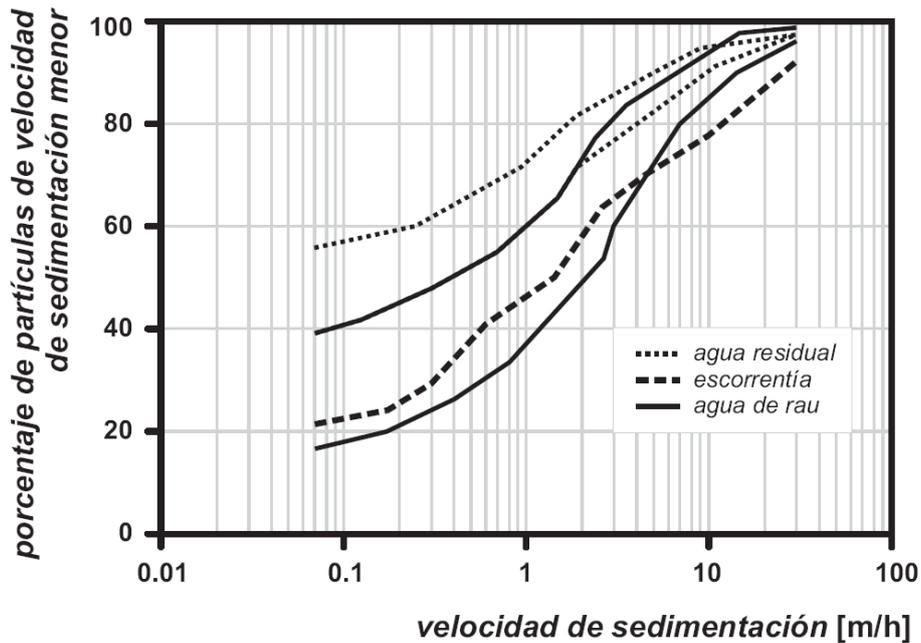


Figura 19.- Velocidad de sedimentación de las distintas fracciones de partículas asociadas a las aguas residuales de la cuenca Le Marais, París (Chebbo y Gromaire, 2004).

En la cuenca urbana de *Le Marais* (París), la erosión de los contaminantes almacenados en las redes es la fuente fundamental de sólidos en suspensión, sólidos en suspensión volátiles, DQO y DBO₅. Así, de toda la contaminación movilizada durante los aguaceros, entre un 26% y un 86% de la contaminación proviene de las conducciones de saneamiento, mientras que la escorrentía superficial produce menos de un 30% de la contaminación. La mayoría de las partículas acumuladas erosionadas en las redes son de naturaleza orgánica, biodegradables y se movilizan progresivamente en los aguaceros a medida que la energía del flujo aumenta (Gromaire *et al.*, 2001).

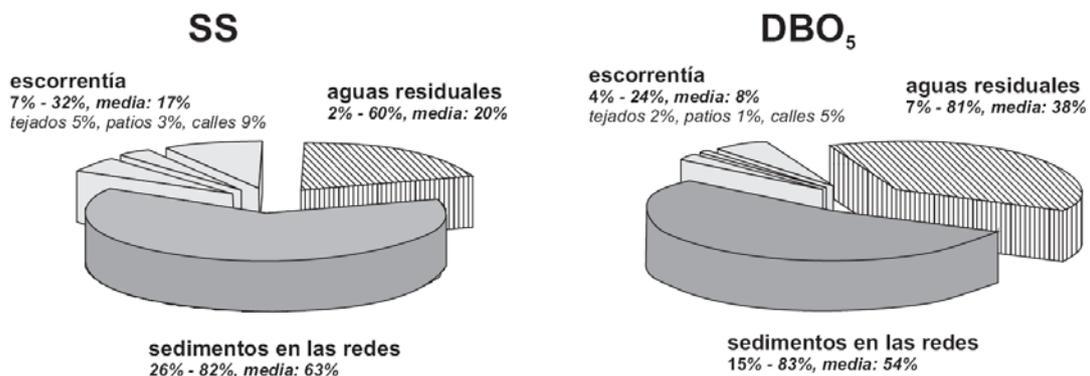


Figura 20.- Contribución de la escorrentía, las aguas residuales y los sedimentos de las redes a las cargas de SST y DBO₅ movilizadas durante los episodios de lluvia en Le Marais, París (Chebbo y Gromaire, 2004).

En esta cuenca, el comportamiento del cobre así como el de los hidrocarburos es similar al de los sólidos o la DBO₅, siendo la resuspensión de sedimentos la principal fuente de contaminación de las aguas de DSU. Sin embargo, otros metales como el cadmio, el zinc o el plomo tienen su fuente principal en la escorrentía de los tejados, debido a que estos materiales se emplean como elementos constructivos en bajantes o canalones.

Los estudios realizados en la cuenca del “Cancelón” (Santiago de Compostela) confirman esta tendencia, presentando los sólidos en suspensión y los metales (concretamente las fracciones particuladas) concentraciones más elevadas en tiempo de lluvia que en tiempo seco. Sin embargo, las CMS de la

contaminantes asociados a materia orgánica y los nutrientes se diluyen durante los episodios de lluvia (Beneyto, 2004).

Otra cuestión que se observó en esta cuenca es que la mayor parte de todos los metales se presentan en forma particulada. En la figura siguiente se presenta a la izquierda las fracciones disuelta y particulada de los metales presentes en las aguas residuales de tiempo seco y a la derecha durante tiempo de lluvia.

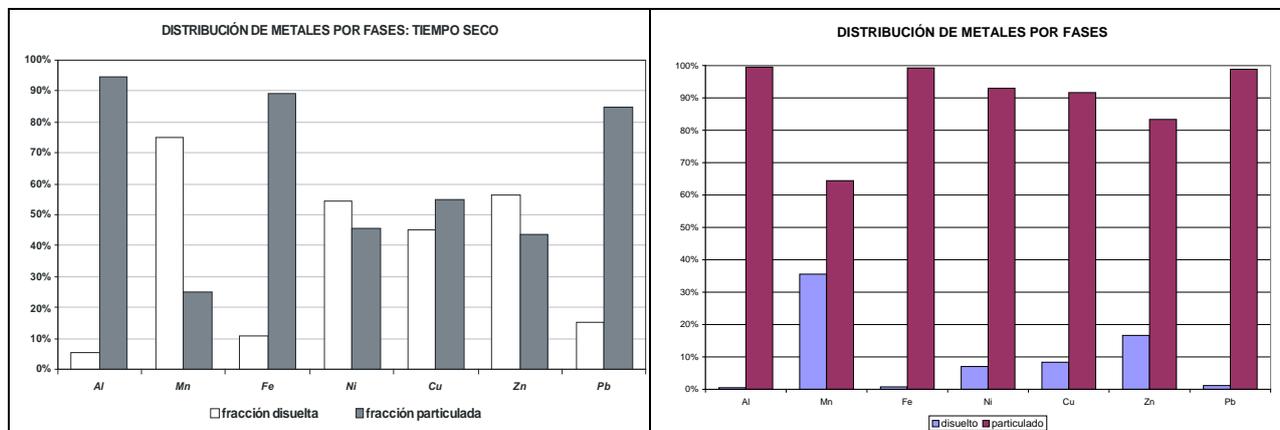


Figura 21.- Comparación de las fracciones disuelta y particulada de las aguas residuales de tiempo (izquierda) y de tiempo de lluvia (derecha) en la cuenca unitaria "Cancelón" (Beneyto, 2004).

De la observación de las figuras se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La mayor parte del manganeso, que en tiempo seco se presentaba en forma disuelta, se presenta ahora en forma particulada.
- El níquel, zinc y cobre, que en tiempo seco el reparto entre las dos fracciones era equitativo, se presenta ahora mayoritariamente en forma particulada.
- La mayor parte del aluminio, hierro y plomo siguen estando presentes en forma particulada y los porcentajes en forma disuelta disminuyen significativamente.

6.- Conclusiones y recomendaciones

La revisión realizada pone de manifiesto la importancia de los sedimentos en la contaminación que es movilizada en los sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia. Gran parte de esa contaminación, con concentraciones punta y masas muy importantes en poco espacio de tiempo, va al medio receptor desde los aliviaderos si en el sistema no se diseñan y construyen sistemas de control y tratamiento de reboses, o si no se desarrollan estrategias de gestión de escorrentías en la superficie de la cuenca (por ejemplo SUDs).

También se ha puesto de manifiesto que los sedimentos, fangos, biopelículas u otros materiales presentes en la red de alcantarillado, tienen una complejidad tanto en tamaños, como en cohesión, reactividad, etc., que hace que modelos utilizados en el diseño de conducciones para evitar su formación no sean del todo efectivos. Modelos como el de Shields, útil con material granulado sin cohesión, no contempla la complejidad de los materiales presentes en el alcantarillado. Un buen análisis y comparación de modelos de interés para estudiar la acumulación, la resuspensión y el transporte de materiales en la red de alcantarillado se realiza en el trabajo "Design of Sewer to Control Sediment Problems" (Ackers et al., 1996), realizado por el CIRIA.

Las prácticas preventivas de limpieza del alcantarillado que eviten la disminución de la sección útil y las obstrucciones, además de evitar o disminuir los malos olores, son técnicas, en definitiva, que ayudan a minimizar la emisión de contaminantes en tiempo de lluvia. Asimismo, otras técnicas preventivas como el control de sedimentos en origen (control de la erosión en construcciones, parques y jardines, limpieza viaria exhaustiva, la correcta coordinación de los servicios de limpieza viaria y de alcantarillado, el uso de fosas de sedimentación, imbornales con arenero lateral, etc.) son medidas que contribuyen a minimizar la

contaminación presente en los colectores. No cabe duda, por supuesto, de que lo fundamental es una buena planificación y un buen diseño de las redes de alcantarillado.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ACKERS, J.C.; BUTLER, D. y MAY, W.P. (1996) "Design of sewers to control sediment problems" Report 141. CIRIA. ISBN: 0 86017 443 3 181 págs.

ANTA, J. (2004). "Estudio de las cargas movilizadas de sólidos por la escorrentía en una cuenca urbana separativa. Análisis de los modelos de acumulación, lavado y arrastre. Proyecto Técnico (Tesina de investigación). Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidade da Coruña. A Coruña.

ASCE; (1992); "Design and construction of urban stormwater management systems". ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice n°77. WEF Manual of Practice FD-20, 723 págs. ISBN 0-87262-855-8, ISBN 1-881369-21-8.

ASHLEY, R. M, CRABTREE B, FRASER A y HVITVED-JACOBSEN T. (2003) "European research into sewer sediments and associated pollutants and processes" ASCE. Journal of hydraulic engineering. Vol 129. No4, pág. 267-275.

ATV-A-118,(1999), "Hydraulic calculation and verification of drainage systems".

ATV-128; (1992); "Standards for the dimensioning and design of stormwater structures in combined sewer"; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA).

BANNERMAN, R.T.; OWENS, D.W.; DODDS, R.B.; HORNEWER, N.J.; (1993); "Sources of pollutants in Wisconsin stormwater"; Wat.Sci.Tech., 28 (3-5), pag. 241-259.

BENEYTO GONZÁLEZ-BAYLÍN, (2004); "Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda"; tesis doctoral, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, director J. Suárez López; Universidade da Coruña.

BUTLER, D., DAVIS, J.W.,(2000). Urban drainage, E&FN SPON

BUTLER, D., MAY, R. y ACKERS, J. (2003) "Self-Cleansing sewer design based on sediment transport principles " ASCE. Journal of hydraulic engineering. Vol 129. No4, pág 276-282.

CANO, A.; TEJERO, I.; (1996); "Contaminación de la escorrentía superficial en un área metropolitana de la ciudad de Santander"; Tesina de Máster de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, E.T.S. de Ing. de Caminos, C. y P., Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.

CAGIAO, J.; DÍAZ-FIERROS, T.; PUERTAS, J.; SUÁREZ, J.; (1998); "A numerical and experimental model of an urban catchment in the north of Spain: parameter fitting and analysis of its behaviour"; UDM '98; Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling; 21-24 september; IAWQ, IAHR, UNESCO, vol. 1; pag. 643-648.

CAGIAO, J.; DÍAZ-FIERROS, T.; PUERTAS, J.; SUÁREZ, J.; (1998); "A numerical and experimental model of an urban catchment in the north of Spain: parameter fitting and analysis of its behaviour"; UDM '98; Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling; 21-24 september; IAWQ, IAHR, UNESCO, vol. 1; pag. 643-648.

CEDEX; (2006); "Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras"; Dos tomos; Gabinete de Formación y Documentación del CEDEX, MOPT, Madrid.

CHEBBO, G. y GROMAIRE, M.C. (2004). «Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers». Journal of Hydrology, No. 299, págs 312–323.

CHN (1995); "Especificaciones Técnicas Básicas para Proyectos de Conducciones Generales de Saneamiento", Confederación Hidrográfica del Norte.

CLAYTOR, R. (1995); "Practical aspects of stormwater pond design in sensitive areas"; en "national Conference on Urban Runoff Management: Enhancing Urban Watershed Management at the Local County, and State Levels"; EPA/625/R-95/003.

CRABTREE, R. W. (1989); "Sediments in sewers". Journal of the Institution of Water and Environmental Management. Núm. 3. Diciembre 1989. págs. 569-578.

DEBO, T.N.; REESE, A.J.; (1995); "Municipal Storm Water Management"; Lewis Publishers; ISBN 087371.981.6.

EPA-821-R-99-012; (1999); "Preliminary data summary of urban storm water best management practices"; Office of Water; US-EPA.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY,(1996), Combined Sewer Overflows, Guidance for Monitoring and Modeling, Washington, DC

GÓMEZ, M. (ed.),(2001) "Curso de hidrología urbana", Universitat Politècnica de Catalunya

- GROMAIRE, M.C., GARNAUD, S., SAAD, M. y CHEBBO, G. (2001). «Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers». *Water Reserarch*, Vol. 35, No. 2, págs. 521-533.
- GUPTA, K.; SAUL, A.J.; (1996); "Suspended solids in combined sewer flows"; *Wat.Sci.Tech.*, 33 (9), pages. 93-99.
- HENZE, M., HARREMOËS, P., JANSEN, J, y ARVIN, E. (1995) "Wastewater treatment: biological and chemical processes" © Spring-Verlag. Berlin.
- HERNANDEZ MUNOZ, A. AND HONTORIA GARCIA, E.J. (1986), «Pollutant removal from highway surfaces in Madrid using irrigation techniques », *Proceedings of 2nd International Symposium Highway Pollution*, pp. 369-390.
- HORNER, R.R.; et al.; (1994); "Fundamentals of Urban Runoff management: Technics and Institutional Issues.;" *Terrene Inst.; USEPA; Washington D.C.*
- HUNTER, J.V.; SABATINO, T.; GOMPERS, R.; MACKENZIE; "Contribution of urban runoff to hydrocarbon pollution"; *Journal WPCF*, vol. 51, nº 8; pag. 2129-2139; agosto de 1979,
- JIMÉNEZ GALLARDO, R.; (1999); "Contaminación por escorrentía urbana"; *Colección Señor, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; ISBN 84-380-0157-2.*
- MALGRAT, P.; (1995); "Panorámica general de la escorrentía de aguas pluviales como fuente de contaminación. Actuaciones posibles"; "Calidad de aguas e impacto en medios receptores por vertidos procedentes de drenajes urbanos y agrícolas"; *Workshop Benicassim*, 28 Nov. 1 Dic..
- MALGRAT P.; (1995). "Control de la contaminación producida en tiempo de lluvia por las descargas de sistemas unitarios de alcantarillado". *O.P. nº 33 Saneamiento II págs. 66-83. ISSN-0213-4195.*
- MARSALEK ET AL.,(1993), "Urban drainage systems. Design and operation", *Water Science and Technology*, Vol 27, n.12, pp.31-70
- METCALF-EDDY (1995); "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización"; *McGraw-Hill; tercera edición; ISBN 84-481-1607-0.*
- METCALF-EDDY (2003); "Wastewater Engineering. Treatment and Reuse"; *International Edition; McGraw-Hill; ISBN 0-07-112250-8.*
- M.M.A. (2002). Asistencia técnica para la redacción de una experiencia piloto de medición y estudio de las descargas de sistemas unitarios (DSU) del alcantarillado a los medios receptores en tiempo de tormenta, en varios municipios españoles. Informe final. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Subdirección General de Tratamiento y Control de Calidad de las Aguas. Madrid.
- NOVOTNY, V. y CHESTERS, G. (1981). *Handbook of nonpoint pollution: Sources and Management. Environmental Engineering Series.* Van Nostrand Reinhold, Nueva York. 555 págs.
- NOVOTNY V.; (1994). "Water quality: Prevention, identification and management of diffuse pollution" *New York Van Nostrand Reinhold.* 1.054 págs.
- OTV (1994); "Depolluer les eaux pluviales. Contribution a lélaboration dune stratégie." *Lavoisier TEC & DOC, Francia, 350 págs., ISBN 2-87777-417-1.*
- PRIDESA. (1995). "Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales". Por: Ronzano, E. y Dapena J.L. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España.
- ROESNER, L.; URBONAS, B.; SONNEN, M.B.; (1989); " Design of urban runoff quality controls";
- SAGET, J.D.; CHEBBO, G.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L.; "The firts flush in sewer systems"; *Wat.Sci.Tech.*, 33 (9); pages. 101-108.
- SANSALONE, J. J. y BUCHBERGER, S. G. (1997). «Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water». *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, No. 2, págs 134-143.
- SARTOR, J. D. y BOYD, G. B. (1972) "Office of research and monitoring, U.S. Enviromental Protection Agency. Water pollution aspects of street surface contaminants". *NTIS. Washington D. C. Págs. 236. ISBN: EPA-R2-72-081.*
- SERVICE TEQNIQUE DE L'URBANISME, (1989), *Mémento sur l'évacuations des eaux pluviales, La documnetation française*
- SHUELER, T.R.; (1993); "Stormwater pond and wetland options for stormwater quality control"; *National Conference on Urban Runoff Management: Enhancing Urban Watershed Management at the Local County, and State Levels; Seminar Publication; March 30 to April 2, Chicago, Illinois; EPA/625/R-95/003.*
- SUÁREZ, J.; TEMPRANO, J.; JIMÉNEZ, R.; TEJERO, I; (1995); "Depuración de aguas residuales urbanas en tiempo de lluvia. Panorámica general"; "Calidad de aguas e impacto en medios receptores por vertidos procedentes de drenajes urbanos y agrícolas"; *Workshop Benicassim*, 28 Nov. 1 Dic.

SUÁREZ LÓPEZ, J.; CAGIAO VILLAR, J.; PUERTAS AGUDO, J.; JACOME BURGOS, A.; BENEYTO GONZÁLEZ-BAYLÍN, ANTA ÁLVAREZ, J.; (2005); “Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impacto sobre ríos”; Ingeniería y Territorio; n° 71, PAGES. 44-55, ISSN: 1695-9647

STAHRE, P.; URBONAS, B.; (1990); “Stormwater detention for drainage, water quality, and CSO management”; Prentice Hall, EE.UU.; 338 pags., ISBN 0-13-849837-7.

TEMPRANO, J.; CERVIGNI, M.; SUÁREZ, J.; TEJERO, J.I.; (1996); “Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia. Control en origen”; Revista de Obras Públicas, Marzo de 1996; n° 3352; Madrid; pag. 45-57.

TEMPRANO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, J.I.; (1997); “Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia. Control de vertidos”; Revista de Obras Públicas, Enero de 1997; n° 3361; Madrid; pag. 47-57.

THOMAS, P.R. y GREENER, G.R. (1993). «Rainwater Quality from Different Roof Catchment». Water Science & Technology, Vol. 28, No. 3-5, págs. 291-299.

UNE-EN 752 (1-7), (1996-1998), “Sistemas de desagües y de alcantarillado exteriores a edificios”. AENOR

URALITA (2003); “Manual de Saneamiento URALITA. Sistemas de calidad en saneamiento de aguas”; Editorial Thomson-Paraninfo; 2ª edición, diciembre 2003; ISBN 84-283-2871-4.

US-EPA (1983) “Results off Nationwide Urban Runoff Progam”. Volume 1. Final Report, Washington D.C.

VALIRON, F.; TABUCHI, J.P.; (1992); “Maitrise de la pollution urbaine par temps de pluie. État de l’art.”; AGH-TM; Tec-doc; París, ISBN 2-85206-863-X.

W.P.C.F. (1989); “Combined sewer overflow pollution abatement”; Manual of Practice FD-17; “Water Pollution Control Federation”; ISBN 0-943244-32-3.