



*Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"
Centro Interamericano de Recursos del Agua(CIRA)
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH)*

XIII SEMINARIO INTERNACIONAL DEL CIRA

**IV TALLER INTERNACIONAL SOBRE GESTIÓN Y
TECNOLOGÍAS DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y
SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**CONTAMINACIÓN APORTADA POR MEDIO DE
LA RED DE PLUVIALES A LOS MEDIOS
ACUÁTICOS EN SISTEMAS DE SANEAMIENTO
SEPARATIVO**

La Habana, Noviembre de 2000



*Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de La Coruña*

CONTAMINACIÓN APORTADA POR MEDIO DE LA RED DE PLUVIALES A LOS MEDIOS ACUÁTICOS EN SISTEMAS DE SANEAMIENTO SEPARATIVO

SUÁREZ, J.; PUERTAS, J.; CAGIAO, J.
Universidad de La Coruña
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
(ETSI Caminos, Campus de Elviña s/n, 15.071,
A Coruña, La Coruña - España
e-mail: suarez@iccp.udc.es).

VÁZQUEZ, F.
Grupo IIT, Ministerio del Transporte
Carretera del Asilo, s/n, Finca Triscornia
Casablanca, Ciudad de La Habana
Cuba
e-mail: fvsantana@iccp.udc.es

Se agradece la colaboración y apoyo prestado por el Excmo. Concello de Santiago de Compostela, AQUAGEST Galicia y a la CICYT, proyectos AMB95-0997-C02, HID-98-0286 y HID1999-0310.

RESUMEN

En la presente ponencia se lleva a cabo una reflexión sobre los conceptos básicos que definen la forma en que se genera la contaminación de la escorrentía urbana, cómo es lavada de las superficies y transportada por la red. En este caso el estudio se centra en las redes separativas. Si estas aguas no se controlan y/o tratan se produce un aporte de contaminación al medio receptor tan importante que no permite alcanzar los objetivos de calidad del agua para usos básicos e impiden la recuperación de los ecosistemas. Se realiza también una revisión sobre los modelos de simulación basándose en el estudio que se está realizando sobre la problemática concreta de la ciudad de Santiago de Compostela, singular por su elevada pluviometría y por la escasa capacidad del río Sar para recibir vertidos. Al englobar todos estos aspectos se llega a la conclusión de que es necesario realizar una revisión global del sistema de saneamiento y "rediseñarlo" aplicando criterios de "gestión integrada" de las aguas y de contaminación (tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia), asumiendo la necesidad de incorporar a la red infraestructuras de control y tratamiento de aguas pluviales.

1.- INTRODUCCIÓN

Los primeros esfuerzos en depuración de aguas residuales se centraron en el control de los vertidos puntuales de origen urbano e industrial. Luego de desarrollar sistemas de tratamiento se comprobó que 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 unitarios de los núcleos urbanos. Estos tipos de vertidos se denominaron "reboses de alcantarillado unitario" (RAU). Entre las medidas que se llevaron a cabo está la construcción de redes separativas, eliminando así de las redes de alcantarillado la sobrecarga que implica un suceso de lluvia, no solo hidráulicamente sino en cargas de contaminantes. También se mantendría a las depuradoras alejadas de cambios fuertes en su sistema de funcionamiento. Las redes separativas vierten directamente al medio receptor las aguas de lluvia, en principio supuestamente limpias, siempre y cuando no existieran conexiones ilegales de otros tipos de aguas. Sin embargo la experiencia y los estudios de contaminación demuestran una influencia muy negativa de los puntos de vertido de las redes separativas en el medio receptor.

Los impactos que pueden producir los vertidos con contaminación de metales, DQO, hidrocarburos y sólidos en suspensión presentes en este tipo de aguas de escorrentía, pueden ser muy negativos. Una visión integrada de la gestión del sistema, que minimice los impactos y permita alcanzar los objetivos de transporte y mantenimiento de la calidad del agua ya fijados, nos obligará a desarrollar una estrategia de control total de la contaminación.

La concentración de actividades humanas genera deposición de polvo, suciedad, arenas, materia orgánica, nutrientes, metales pesados, tóxicos y contaminación bacteriológica sobre las superficies del medio urbano. Estos materiales son lavados y arrastrados por la escorrentía superficial, y al final acaba aumentando la contaminación de las aguas receptoras. Al depositarse los materiales que iban en suspensión los organismos mueren al quedar enterrados. Los nutrientes contribuyen a la mejora de la productividad pero pueden generar problemas de eutrofización. La materia orgánica biodegradable genera descensos en los niveles de oxígeno disuelto. Los metales pesados, los hidrocarburos y la sal pueden ejercer efectos crónicos o de toxicidad aguda sobre los ecosistemas acuáticos. La contaminación bacteriológica por las aguas de escorrentía puede generar riesgos para la salud. Todos estos impactos perturban los posibles usos de la masa de agua receptora.

Actualmente, se admite que el control de estas aguas debe realizarse bajo el principio de la “Gestión Integrada”, considerando todas las relaciones que se establecen entre:

- Lluvia
- Superficie de cuenca
- Sistema de colectores
- Elementos de Retención (Tanques de tormenta, etc.)
- Estación depuradora
- Medio receptor

Aplicando siempre las que son definidas como “métodos de gestión racional” (BMP- “Best Management Practices”, Horner, Skupien, 1994). Para poner en práctica estas medidas se necesita tener un buen conocimiento de los siguientes puntos:

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

2.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

2.1.- FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA URBANA

En general, las fuentes de contaminación pueden ser clasificadas en dos categorías: fuentes puntuales y fuentes difusas. Una fuente puntual es contaminación aportada al medio a 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; su control, ya sea en su origen, o en su acceso a los sistemas acuáticos, es muy difícil. La contaminación difusa se caracteriza por (Novotny, 1991 y Deutsch, 1989):

- Acceder al medio receptor a través de vertidos intermitentes que están ligados a un fenómeno de naturaleza aleatoria: la lluvia.
- Contaminación procedente de zonas muy extensas, incluso aunque se suponga la existencia de lugares de almacenamiento como las cunetas o la misma red de drenaje.
- Vertidos con una alta variabilidad en concentraciones tanto en el tiempo, durante un mismo suceso, como de un suceso a otro. Las concentraciones medias pueden variar en una relación de 1 a 40 para un mismo parámetro y en una misma cuenca vertiente.
- Resulta muy difícil hacer un muestreo de la contaminación en el origen.
- Las materias en suspensión transportadas por las aguas pluviales son de naturaleza esencialmente mineral (su fracción orgánica es del orden del 30%).

En las últimas décadas se ha producido un intenso movimiento de concentración de la población en las zonas urbanas y a la vez se han ido incrementando las actividades industriales. En dichas áreas se produce una gran cantidad de contaminación difusa que luego accede a los medios receptores sobrepasando, en la mayoría de los casos, su capacidad de asimilación o autodepuración. La escorrentía superficial urbana lleva consigo una muestra representativa de dicho fenómeno, de ella se puede obtener los parámetros de conducta y comportamiento de la urbe hacia su entorno físico.

Son muy diversas las causas de la contaminación de la escorrentía superficial urbana. La lluvia atrapa 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. El agua se moviliza hacia los puntos de recogida, drenando las superficies, limpiando y transportando en disolución o en suspensión los contaminantes acumulados. La contaminación de la escorrentía urbana llega al medio receptor por dos tipos de vertidos: los directos desde la red de pluviales de un sistema separativo y los vertidos procedentes de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia. Con estos últimos, además de la contaminación propia de la escorrentía superficial urbana, se vierte al medio receptor contaminación de las aguas residuales urbanas de tiempo seco.

A continuación se analizan brevemente cada uno de los posibles focos de la contaminación de la escorrentía urbana

Contaminación atmosférica:

Los contaminantes presentes en la atmósfera, de una forma u otra, son atrapados por la lluvia a su caída y transportados por la escorrentía por las superficies impermeables. Numerosos autores han obtenido datos de contaminación de agua de lluvia comparando zonas sin contaminación con zonas urbanas (contaminadas). La tabla siguiente muestra la variabilidad que puede presentar la calidad del agua de lluvia por efecto de su contaminación al atravesar la atmósfera.

Cuenca	SST (mg/L)	NTK (mg/L)	P (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
Göteborg (Suecia)	-	-	0.04 - 0.12	0.03 - 0.06	0.005 - 0.15
Munich (Alemania)	-	-	4.95	0.110	0.08
Maurepas (Francia)	4	0.6	-	0.008	0.022
Les Ulis Nord (Francia)	5	1.3	0.05	0.009	0.051

Fig.1. Contaminación del agua de lluvia en ciudades europeas (Deutsch, et. al., 1989)

Algunos autores afirman que la principal causa de deterioro de la calidad del agua de lluvia por efecto de la contaminación atmosférica se debe al nitrógeno y sus formas, por lo que el aporte de nutrientes en la escorrentía superficial no es despreciable. Whipple, et al. (1983), Kluesner, (1974), citados por Huber (1988), mencionan que en las aguas de lluvia las cargas de nitrógeno y sus formas pueden ser superiores a las presentes en el suelo por contaminación difusa.

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.

Contaminación de la superficie de la cuenca:

Residuos animales:

En el medio urbano los mamíferos más abundantes son los perros y los gatos; las aves, como las palomas, gorriones, gaviotas o estorninos también representan una población significativa. Todos ellos, generan residuos que, por lo general, se depositan en las calles, plazas, y aceras. Al llover 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 que causan enfermedades a los seres humanos; sin embargo su presencia no está asegurada al utilizar como indicadores los coliformes fecales y los estreptococos. Según el *NURP (US-EPA, 1993)*, las aguas de escorrentía urbana contienen entre 10⁴ y 10⁵ UFC/100 mL, por lo que la presencia de patógenos es bastante probable.

Basura y residuos:

Las zonas urbanas se caracterizan por ser fuentes de producción de residuos sólidos. Las actividades diarias ocasionan el depósito sobre las superficies de las calles de materiales como papeles, cartones, residuos textiles, madera, goma, vegetales, hojas, colillas, vidrios rotos, polvo, etc. 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.

Tráfico rodado:

El plomo y el zinc son los metales pesados más abundantes en la escorrentía urbana. Chistensen (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 son el desgaste de frenos y las emisiones de los motores. El plomo es debido principalmente a las emisiones de los vehículos y está fuertemente asociado con las partículas finas. Otras fuentes de contaminación debidas al tráfico son el goteo, fugas de aceites y lubricantes. Del uso y deterioro de los vehículos pueden generarse también residuos de plástico y vidrio (por ejemplo como resultado de impactos). Otros metales como el hierro, el bario o el cesio están asociados a las partículas de desgaste de frenos. Los neumáticos también pueden aportar antimonio (Thomson, 1997). Los metales pesados y los PAHS están asociados fundamentalmente con los sólidos particulados, y más concretamente con la fracción fina (limos). El plomo es un claro ejemplo (las referencias dan valores del 90 al 99%). Estas partículas tienen una gran capacidad de adsorción con una gran relación área/volumen, además de ser más activas químicamente. Al estar los metales asociados con las partículas estos serán movilizados en función de las velocidades del flujo superficial. Esto determina que la predicción de la movilización de los mismos durante los sucesos de lluvia sea complicada.

Las masas de zinc y plomo presentes pueden relacionarse con la cantidad de tráfico. Así, Chistensen (1979), valoró que se deposita un promedio de 0.0030 g de Zn/vehículo/Km y 0.0049 g de Pb/vehículo/Km. Pitt y Army (1973), citados por Wanielista (1979), demostraron que en áreas industriales se pueden producir cargas contaminantes de aceites y grasas del orden de 9.26 Kg/Km de cuneta y día; en áreas residenciales de 5.25 Kg/Km de cuneta y día, y en zonas comerciales de 1.38 Kg/Km de cuneta y día. Los hidrocarburos también son uno de los contaminantes asociados al tráfico de vehículos en las cuencas. Un agua de escorrentía de una cuenca altamente poblada y con alta densidad de tráfico aporta una gran carga de hidrocarburos. Valores de 30-40 mg/L de HCT son habituales en la literatura. Al igual que algunos metales pesados también van asociados a la fracción particulada (más del 80% según Hunter et al., 1979); valores lógicos debido a la poca solubilidad de este tipo de compuestos en agua.

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 (el frío acelera la degradación; se usan cadenas en las ruedas, se utiliza arena y productos químicos antideslizantes, etc.); el derrame de disolventes (gasolinas por ejemplo), etc.

Posibles actividades agrícolas y de jardinería:

Ningún entorno urbano está completamente delimitado. 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.

Terrenos con obras y superficies no protegidas:

En muchas zonas urbanas existen terrenos en donde no existe edificación, o se encuentran abandonados o en espera de una nueva edificación. Este suelo está expuesto a procesos de erosión. La cantidad de sedimentos en los vertidos de aguas de tormenta que proceden de zonas con terrenos en construcción puede variar considerablemente. Estudios recientes demuestran que 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 de forma natural (ASCE, 1993). 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 sus lixiviados de la basura (Lázaro, 1990; Whipple, 1983).

CONTAMINANTE	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE FONDO	EROSIÓN DEL SUELO	DETERIORO DE VEHÍCULOS Y RODADURA	EMISIONES GASEOSAS DE VEHÍCULOS	PRODUCTOS INDUSTRIALES	COMBUSTIBLES FÓSILES	QUÍMICOS USADOS EN CÉSPED Y JARDINES	AVES Y MASCOTAS
SS	P	M	M			P		
MO		M	M	P				M
N	P	P		M		M	M	M
P		M		P			M	M
HIDROCARBUROS			M	M	M			
BACTERIAS Y VIRUS								M
Fe		M						
Mn		M						
Zn		P	M		P		P	
Pb	P			M	P			
Cu			M		M			
Cr			M		M			
Ni			P		M			
Cd			P		M	M		
Sulfuro	P			P		M		M
Ácido Nítrico	P			M		M		
Ácido Sulfúrico	P							
Pesticidas, insecticidas, herbicidas							M	

M...mucha aportación

P...poca aportación

Fig.2. Aportación de contaminantes por motivo de diversas fuentes.

2.2.- ACUMULACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE DE LA CUENCA

Sartor, Boyd y Agardy (1974) realizaron una de las investigaciones pioneras en este campo; sus conclusiones sobre la acumulación de suciedad en la superficie de una cuenca fueron:

- La escorrentía procedente de la superficie de las calles, generalmente, está muy contaminada.
- El constituyente principal de los contaminantes en la superficie de las calles es inorgánico, material mineral, similar a arena o limo.
- La cantidad contaminante que hay en esa zona depende del tiempo transcurrido desde la última vez que el área fue limpiada, bien manualmente o bien por un aguacero.
- La cantidad de contaminante presente en diferentes calles es muy diferente y no se distribuyen uniformemente a lo largo de ella
- Una gran parte de la contaminación potencial está asociada con la fracción fina de los sólidos presentes en las calles.
- El cálculo de la DQO proporciona una buena base para estimar la demanda potencial de oxígeno.
- La velocidad a la que un aguacero levanta la materia en forma de partículas de la superficie de la cuenca depende de tres factores: intensidad del aguacero, características de la superficie de la calle y tamaño de las partículas.
- Las prácticas habituales de limpieza son, fundamentalmente, para lograr propósitos estéticos. Incluso mediante una correcta operación de limpieza su eficiencia en la eliminación de la fracción fina de la suciedad de las calles es baja.
- Los imbornales con depósito son efectivos para la eliminación de sólidos inorgánicos gruesos (arena gruesa y gravilla) procedentes de la escorrentía, pero son ineficaces en la eliminación de los sólidos finos y de la mayor parte de la materia orgánica.

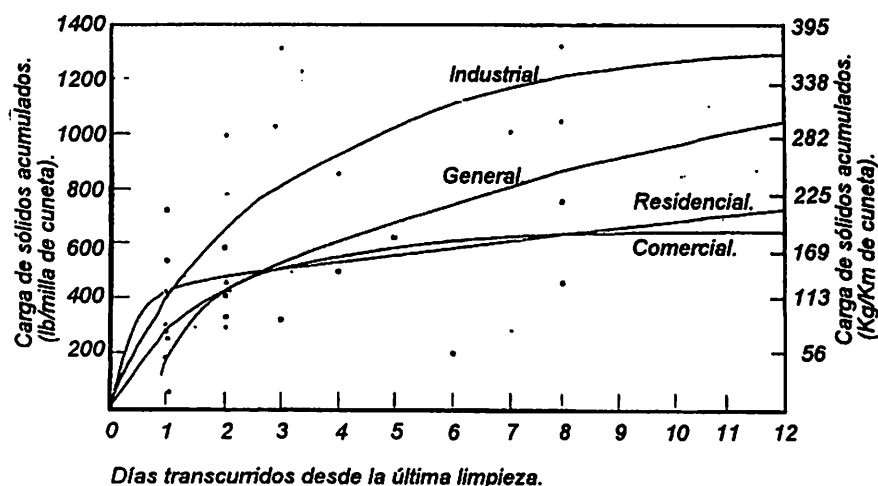


Fig.3. Acumulación de suciedad en diferentes tipos de cuencas

Diferentes autores han investigado la evolución en el tiempo de los depósitos acumulados en las superficies impermeables de las calles. En la figura se muestra esta acumulación como función del tipo de cuenca y del tiempo transcurrido desde la última limpieza o lluvia (Sartor y Boyd, 1972, modificadas por Temprano, 1996).

2.3.- LAVADO DEL POLVO Y LA SUCIEDAD ACUMULADA EN LA CUENCA

Sartor y Boyd (1977) detallaron los diferentes mecanismos implicados en el lavado superficial de los contaminantes de las calles; en líneas generales el proceso consta de:

- Separación del contaminante de la superficie de la calle.
- Transporte de las partículas hacia las cunetas.
- Transporte de las partículas desde las cunetas hacia la alcantarilla.
- Transporte dentro de los conductos.

Los contaminantes son eliminados de la superficie por dos mecanismos que parecen actuar simultáneamente:

- Las fracciones solubles van en disolución y las posteriores gotas de lluvia originan una turbulencia que favorece la mezcla y proporcionan un aporte continuo de disolvente limpio.
- La materia, en forma de partículas y con tamaños que van desde granos de arena hasta coloides, se desagrega por el impacto del agua de lluvia que cae. Una vez desagregadas las partículas pueden mantenerse en un estado de pseudosuspensión debido a la turbulencia creada por las gotas de lluvia adicionales.

Estos autores sugieren que estos procesos pueden ser muy fácilmente descritos cualitativamente pero que era preciso, estamos en el año 1977, más información que considere todas las variables implicadas para poder conseguir una descripción cuantitativa, lo cual es mucho más difícil. Ranchet y Deutsch (1982) estimaron que la influencia preponderante respecto a las concentraciones máximas de un contaminante en el polutograma se debe a la intensidad máxima de la lluvia y a la duración del tiempo seco previo a la misma.

Sartor et al. (1974) propusieron la ecuación siguiente para evaluar la masa de materia correspondiente a un cierto tamaño lavada por una aguacero:

$$N_C = N_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot r \cdot t})$$

En donde:

N_0 = Masa inicialmente acumulado de partículas de un cierto tamaño.

T = Duración del aguacero.

N_C = Masa de las partículas lavadas tras un tiempo "t".

R = Intensidad de la lluvia.

K = Constante.

La constante "k" depende del tipo de superficie, pero parece ser independiente del tamaño de las partículas. Observaron que las superficies con pavimento rugoso muestran valores más elevados de N_C . Por ejemplo, las calles asfaltadas (habría que matizar este término) tienen cargas un 80% superiores a las del hormigón. Para superficies más rugosas que las de las calles se necesita más agua (escorrentía) para eliminar la misma cantidad de material.

Barkdoll, Overton y Betson (1977) propusieron que las tasas de eliminación son específicas de cada contaminante y, por lo tanto, ningún modelo puede definir la eliminación de todos los contaminantes. Estos autores opinaban que la eliminación es función de la escorrentía total y está sólo parcialmente influenciada por la intensidad.

Después de los sucesos de lluvia la carga de contaminación remanente en la superficie de la cuenca habrá variado. La evolución de la misma tras varios sucesos de lluvia queda representada en la figura siguiente.

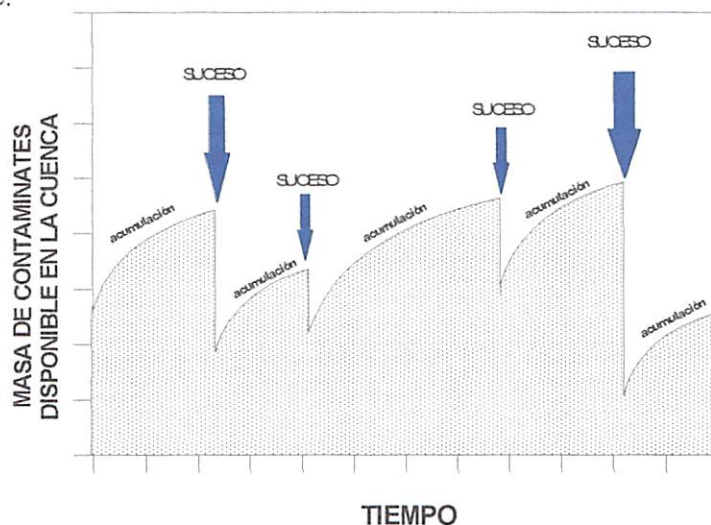


Fig.4. Gráfica que representa los cambios en la acumulación de la masa contaminante según los sucesos

2.4.- PARTICULARIDADES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA.

Los vertidos de aguas residuales pluviales se caracterizan por:

- Las concentraciones de SS y DQO son muy importantes, y pueden ser superiores a las de las redes unitarias en tiempo seco y en tiempo de lluvia.
- Los SST tienen una composición fundamentalmente mineral (la fracción orgánica es del orden del 30%).
- La relación de biodegradabilidad (DQO/DBO_5) es débil, del orden de 4 a 6, contra los 2 a 2.5 de un agua residual de tiempo seco.
- Presencia muy importante de metales pesados y de hidrocarburos.
- Una gran parte de los contaminantes están fijados a los SS.
- La densidad de las partículas y velocidad de caída es mayor que las de las redes unitarias. Importante para los procesos de decantación. La escorrentía de pequeñas lluvias es menos decantable debido a que tienen una fracción orgánica superior.
- El tamaño de las partículas transportadas es grande en general, y es tanto mayor cuanto más aumenta la intensidad de la lluvia.

2.5.- EL FENÓMENO DEL PRIMER LAVADO

Un fenómeno asociado con las características de la contaminación acumulada y con la lluvia es el fenómeno llamado “primer lavado” (“first flush” en la literatura anglosajona o “premier flot” en la francesa). Este fenómeno consiste en que una elevada proporción de la masa acumulada de contaminantes es lavada en la parte inicial de la lluvia. Esto influye directamente en el dimensionamiento de las unidades de retención, o tanques de tormentas, de esta manera diseñamos el tanque para que retenga solo la parte más cargada del suceso.

Thornton y Saul (1996), así como Pearson et al. (1986), definen el primer lavado como el periodo inicial de un suceso de lluvia-escorrentía en el que la concentración de contaminante es significativamente superior a la observada durante las etapas posteriores del aguacero. Varios factores influyen en el primer lavado como, hora del día, condiciones de tiempo seco, duración del periodo de tiempo seco previo, tipo de lluvia, características de la red, (Gupta et al., 1996). Sthare y Urbonas (1990) sugieren que se da un primer lavado fuerte cuando el 20% de la escorrentía contiene el 80% de la masa de contaminante.

Una buena muestra de “primer lavado” se obtiene durante los treinta primeros minutos de la descarga. Esta fracción es generalmente la más contaminada porque puede contener la contaminación depositada sobre la superficie de la cuenca. Debe medirse el pH y temperatura ya que proporcionarán información sobre la forma en que los metales son vertidos al medio receptor. Debería estudiarse en laboratorio los siguientes parámetros convencionales:

- DQO
- NTK
- NO_2^- y NO_3^-
- P total
- Aceites y grasas. (30 mg/L es un valor típico alto)
- SST
- DBO_5

Podemos ver en la siguiente gráfica la relación entre el caudal y las concentraciones de diferentes contaminantes. Tanto en punta de caudal como en el desarrollo del suceso de tormenta. Se observa que si logramos retener las primeras cuatro horas del caudal, lograremos retener gran parte de la masa contaminante que iría a parar al medio receptor

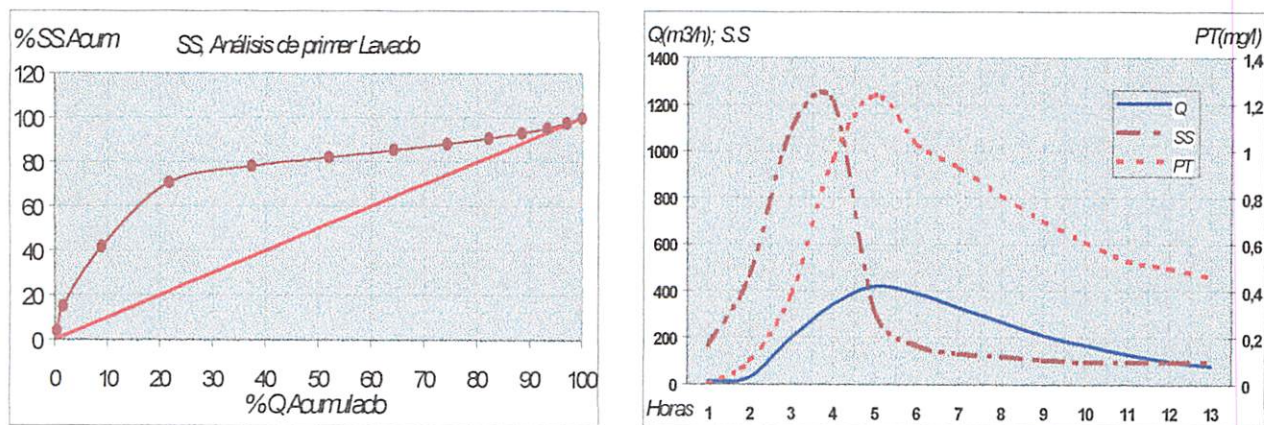


Fig.5. Efecto del primer lavado en función de las concentraciones del polutograma (Di Toro y Samall, 1979) .

3.- OBJETIVOS DE LOS ESTUDIOS EN SANTIAGO DE COMPOSTELA

El objetivo final del estudio que se está realizando en la ciudad de Santiago de Compostela es lograr el diseño de unas “Directrices de Gestión Integral del Saneamiento de Santiago de Compostela” en las que se establezcan las medidas de actuación necesarias para conseguir una calidad de agua en el medio receptor manteniendo la mejor relación coste/beneficio ambiental.

Para ello se están desarrollando los siguientes aspectos:

- Análisis y recopilación de datos de las cuencas (cuena hidrográfica y cuencas urbanas).
- Medida y análisis de lluvias.
- Elaboración de modelos de simulación de la red de drenaje (transformación lluvia - caudal, generación y arrastre de contaminación en superficie, hidráulica y calidad en colectores).
- Caracterización de sucesos de rebose (frecuencia, hidrogramas, polutogramas, etc.).
- Elaboración de un modelo de calidad de aguas del río Sar. Simulación de impactos por vertidos en tiempo seco y por sucesos de rebose en tiempo de lluvia. Análisis del cumplimiento de estándares de calidad (tiempo seco y de lluvia).

Es importante resaltar que la metodología empleada está basada en la utilización de modelos numéricos que simulan de forma continua los procesos físicos de tipo hidráulico y de transporte y reacción de contaminantes, y que una vez calibrados nos permitirán ensayar las mejoras necesarias que optimicen el sistema de saneamiento y que nos permitan alcanzar los niveles de calidad establecidos para el medio receptor (tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia).

Los objetivos científicos - técnicos de los trabajos que se están realizando actualmente son:

- Caracterización de la contaminación de las escorrentías superficiales urbanas en relación con los usos del suelo en subcuencas urbanas de la ciudad de Santiago de Compostela.
- Diferenciación entre la contaminación aportada en tiempo de lluvia al medio receptor por una cuena urbana con red de alcantarillado separativo y una con red de alcantarillado unitario.
- Evaluación de los metales pesados movilizados en los sucesos de lluvia y diferenciación entre fracción asociada a fase disuelta y a fase particulada.
- Análisis y estimación del efecto del primer lavado.
- Proposición de un polutograma de diseño para las cuencas estudiadas.
- Adquirir experiencia, mejorar tecnología y metodologías para la caracterización de sucesos de tormenta, sobre todo con sistemas de medición en continuo, válidos para control y alarma.

3.1.- METODOLOGÍA UTILIZADA EN SANTIAGO DE COMPOSTELA.

3.1.1.- Estudio de la cuenca

Santiago de Compostela es la capital de la Comunidad Autónoma de Galicia. Con una población creciente de más de 100.000 habitantes es la tercera ciudad de Galicia. Se encuentra situada entre dos ríos, el Sar y el Sarela, afluente del primero. La ciudad tiene una pluviometría media de 1300 mm. Dispone de un sistema de saneamiento heterogéneo, como sucede en todas las ciudades que han ido consolidando su estado a lo largo de siglos: distintos materiales y distintos enfoques técnicos se han ido superponiendo hasta conformar la situación actual. La cuenca urbana se podría describir de forma general en dos tipologías, una con urbanización cerrada de 3.9 km² (80% impermeable) y otra de urbanización abierta de 5.5 km² (20% impermeable). El sistema de saneamiento de Santiago es en su mayor parte unitario excepto las nuevas áreas urbanizadas, como la cuenca que analizada en el presente trabajo (Fontiñas). Se diferencian claramente tres zonas: el casco antiguo, zona del ensanche, y nuevos asentamientos (siete subcuencas en total).

El sistema de colectores interceptores tiene forma de "Y" y discurre paralelo a los ríos Sar y Sarela, tal y como se observa en la figura siguiente.

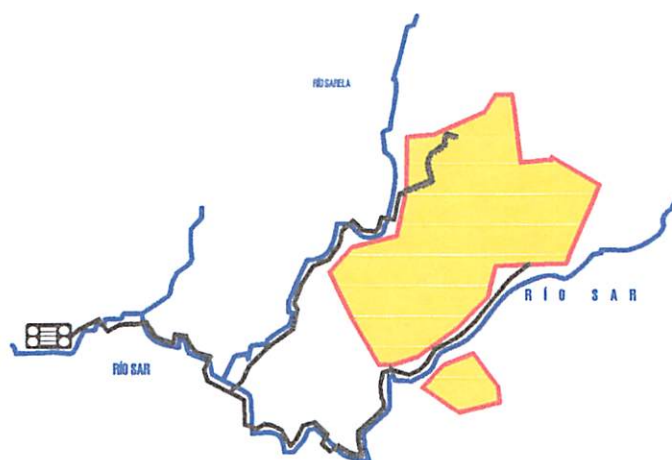


Fig.6. Situación de la ciudad de Santiago con respecto a río Sar y al Sarela

La subcuenta estudiada que se presenta en este trabajo es la denominada "Fontiñas". Posee una red separativa con una superficie de 45 hectáreas, 65% urbanizado (uso residencial), y una pendiente media de un 6%. Sus vertidos son directos al río Sar, varios kilómetros aguas arriba de la EDAR.

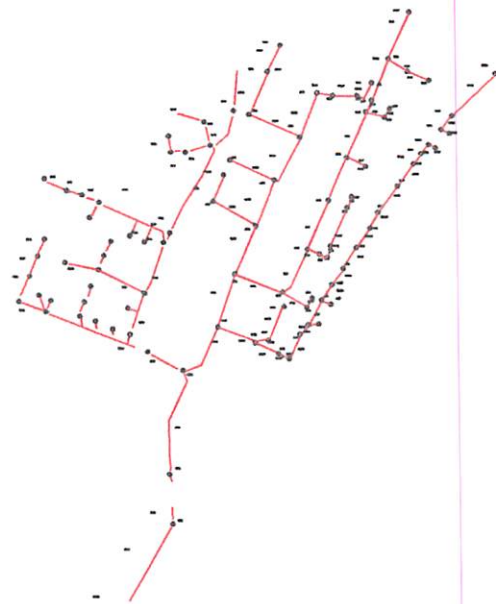
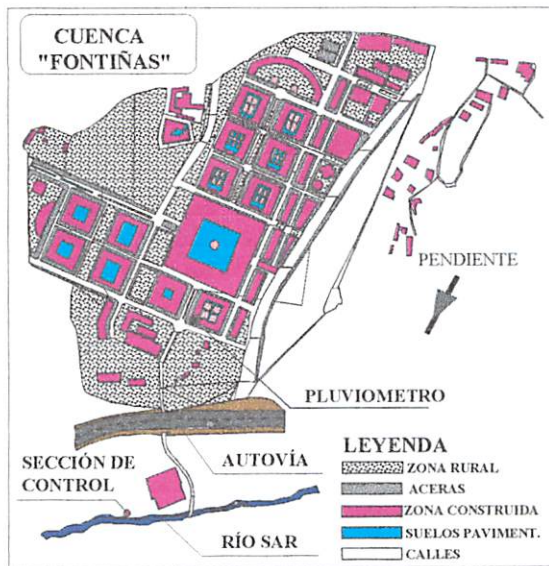


Fig.7. Cuenca de estudio. Sección de control "Fontiñas". Tipos de superficies

3.1.2.- Modelización

Para llevar a cabo la modelización de la cuenca se ha utilizado, en primera instancia, el programa llamado SWMM ("Storm Water Management Model") de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Se trata de un modelo ampliamente contrastado durante más de 25 años por científicos e ingenieros de todo el mundo. Este modelo está dividido en bloques que se traspasan información. Se han empleado los siguientes bloques: 1) RUNOFF, que genera los hidrogramas y polutogramas de la escorrentía a partir de los datos de lluvia y las características de contaminación en superficie; 2) EXTRAN, que simula el flujo hidráulico en la red de conductos empleando las ecuaciones completas de Saint Venant; 3) TRANSPORT, que simula el flujo de contaminantes a través de la red hasta nuestra sección de control.

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

3.1.3.- Datos de campo

Los datos de campo necesarios para nuestro estudio se dividen en dos tipos:

- Datos de modelo, para introducir en el modelo hidráulico y de calidad: lluvia, topografía de la superficie urbana, topología de la red de conductos, caudal base y su caracterización durante tiempo seco, información sobre la acumulación de polvo y suciedad en superficie según usos del suelo, etc.
- Datos de calibración del modelo, es decir, para el proceso mediante el cual se ajusta el modelo numérico para que los resultados simulados se asemejen a los observados. Dichos datos son: caudales, para la calibración hidráulica, y parámetros de contaminación (SST, SDT y metales pesados) para poder efectuar la calibración de calidad.

3.2.- PRIMEROS RESULTADOS

3.2.1.- Hidráulica ← ¿Texto?

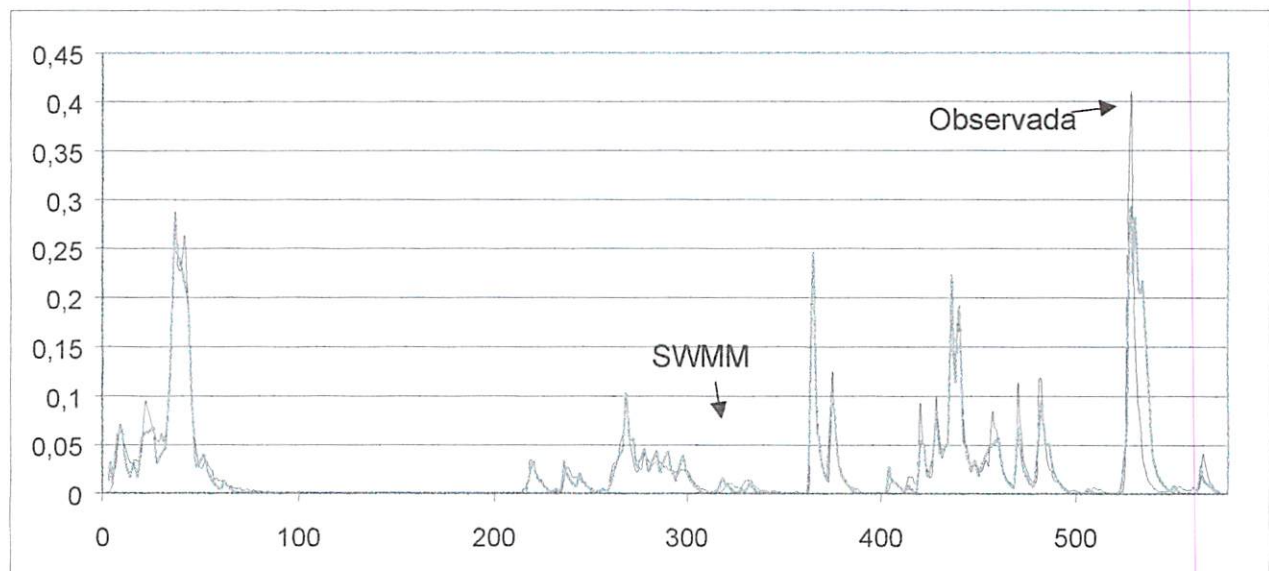


Fig.8. Ajuste de la escorrentía con un modelo basado en una red de neuronas artificiales y con el SWMM en "Fontiñas".

3.2.2.- Contaminación

La sección de control de la red de pluviales de Fontiñas estaba constituida por un caudalímetro SIGMA 950 (doppler- ultrasonidos) y un tomamuestras automático SIGMA 900. Con programación específica para muestreo de aguas de tormenta. Se caracterizaron 10 sucesos de lluvia. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos.

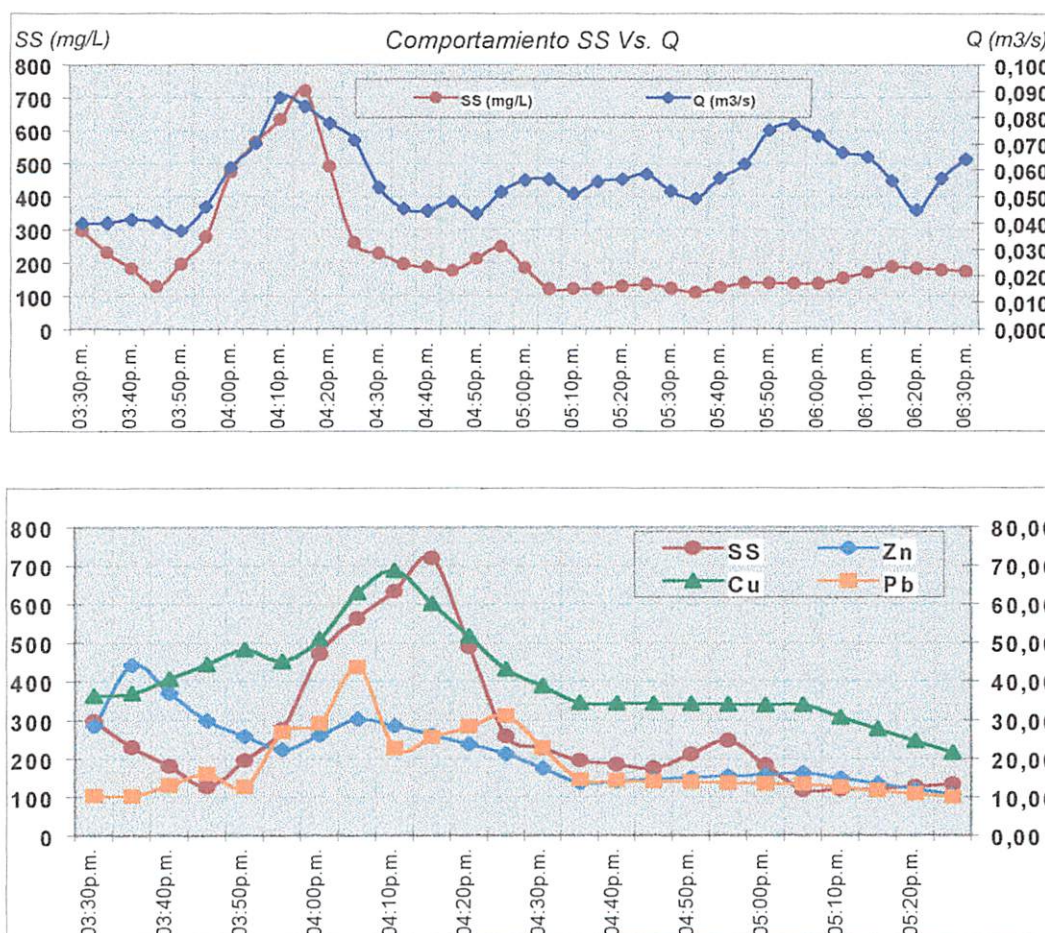


Fig.9. Suceso de lluvia del 4 de Mayo de 1999 en Fontiñas. Movimiento de metales y sólidos

Es apreciable que las mayores tasas de eliminación ocurren en la primera parte del suceso, en este caso incluso solo en los primeros 15 minutos se obtiene la punta de concentración de sólidos en suspensión (SS). Aunque cabe destacar que al cabo de 30 minutos de lluvia aún los valores de SS rondaban los 1000 mg/l. Es apreciable en la gráfica que reteniendo la primera media hora del suceso dejaríamos de verter al medio receptor la practica totalidad de los sólidos arrastrados por este evento.

Se presenta la caracterización de un suceso de tormenta que produjo un lavado de la ciudad, provocando que las concentraciones de SS, metales pesados e hidrocarburos aumentasen de una forma muy significativa. Se verán gráficas de análisis de primer lavado donde se aprecia claramente la carga contaminante arrastrada. Se ha usado el mismo suceso visto anteriormente por ser muy representativo de los fenómenos analizados en este trabajo.

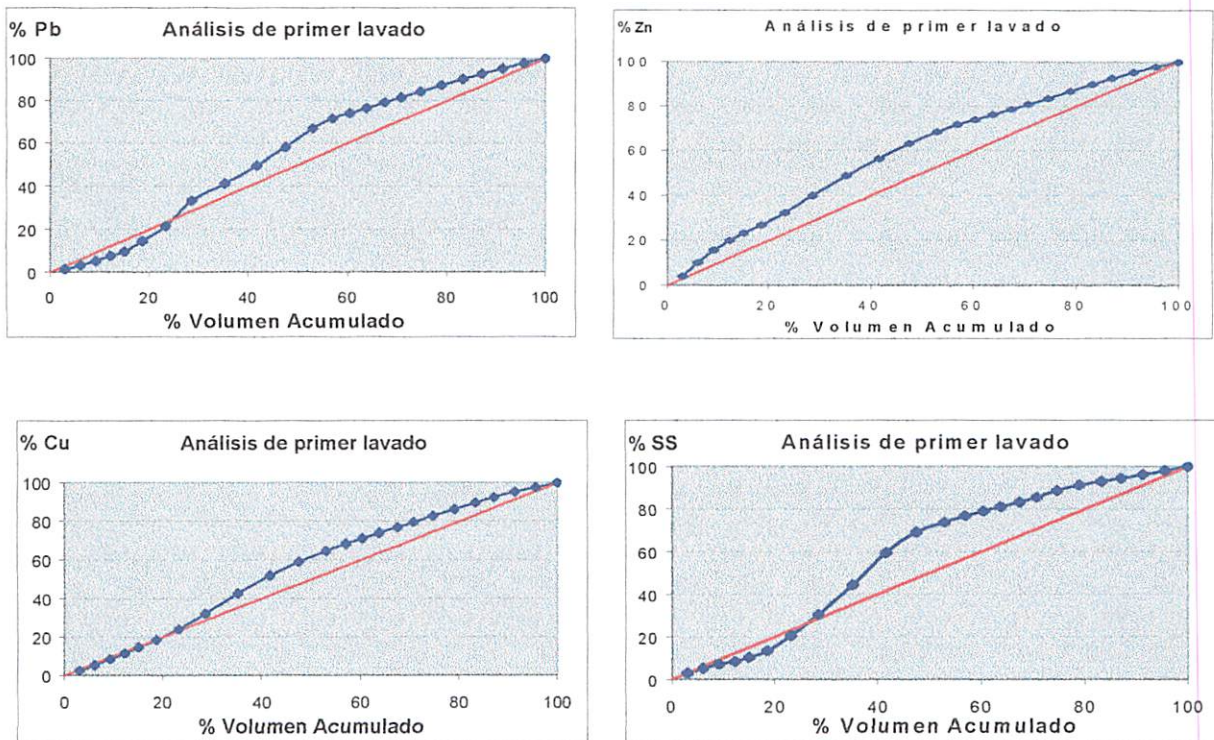


Fig.10. Gráficos de los análisis de primer Lavado para los principales metales y sólidos. 4 de mayo de 1999

Las gráficas nos demuestran claramente que la mayor parte de los contaminantes son arrastrados en la primera parte de la lluvia. Se marca claramente que pasado el 40% del suceso ya han sido arrastrados en todos los casos más de la mitad de los contaminantes. La gráfica de los sólidos en suspensión es la curva más clara en cuanto a esto tipo de fenómeno, con el 50% del volumen de lluvia ya han sido arrastrados más del 70% de los sólidos.

El registro de toda la información de los sucesos se ha normalizado en un formato de ficha tipo que simplificara el análisis a información de los estudios. De cada suceso se calculan unos parámetros específicos que facilitarán la realización de un análisis correlacional de todos los sucesos de tormenta registrados, permitiendo obtener unas tendencias y parámetros que definan la movilización y vertido de masas de contaminantes en tiempo de lluvia, tanto en cada cuenca como en la ciudad. Esta fase es fundamental para posteriormente definir las estrategias de control de cada cuenca. ~~En~~ La continuación se muestra una tabla que resume los valores más importantes recogidos en la ficha tipo en cuanto a calidad del agua se refiere.

Caract.	Valores			
	Unidades	Max	Min	Media
SS m	mg/l	581.0	49.00	315.00
SS mín	mg/l	120.0	10.00	65.00
SS máx	mg/l	3526.0	84.00	1805.00
M ss	Kg/Ha	278.0	0.60	139.40
CMS				
Cu	µg/l	159	35	97.00
Cu máx	µg/l	405.07	68.7	236.89
Pb	µg/l	77.15	12.88	45.02
Pb máx	µg/l	187.3	14.20	100.75
Zn	µg/l	442	136	289.00
Zn máx	µg/l	2800.6	264.8	1532.70

Fig.11. Tabla resumen de la ficha tipo. Calidad del agua

Parámetros	Concentración Media	Concentración de Diseño según el NURP (mg/l)	Valores medios Medidos en Fontiñas
SST	23.9	180-548	315
DBO	12	12,0-19,0	-
DQO	94	82-178	152
P Total	0,5	0,42-0,88	-
P Solubles	0,15	0,15-0,28	-
NTK	2,3	1,90-4,18	-
Cu (µg/l)	53	43-138	97,00
Pb (µg/l)	238	182-443	45,02
Zn (µg/l)	353	202-633	289,00

*Valores típicos de contaminación de la escorrentía urbana en zonas residenciales y comerciales. NURP, 1983, ASCE, 1992

Fig.12. Tabla comparativa entre los valores de campo del presente estudio y valores obtenidos de la literatura

4.- CONCLUSIONES

Del contenido de la presente comunicaciones se pueden aportar las siguientes conclusiones:

- Ante una estrategia de implantación de un sistema de control y/o tratamiento (bien en la superficie de la cuenca, en la red de alcantarillado ó en la EDAR) es preciso un conocimiento “exhaustivo” del comportamiento de la cuenca drenante en cuanto a hidráulica y a movilización de los contaminantes (tipos, flujos máxicos, forma en que se presentan, etc.).
- El modelo de simulación numérica ha dado buenos resultados en el ajuste hidráulico del estudio, pero siempre ha de ir acompañado de una buena campaña de medición de caudales en campo, imprescindible para la calibración de dicho modelo.
- Como cada cuenca tiene un comportamiento singular debe ser analizada, por lo menos, en un número mínimo de sucesos con el fin de poder analizar primer lavado, granulometrías de los sólidos, concentración media de sucesos, etc. Esta información permitirá posteriormente pasar al uso de modelos matemáticos que nos den resultados fiables.
- Aplicar criterios de diseño de forma sistemática para diferentes elementos de retención puede conducir a soluciones que no resuelvan los problemas. Incluso entre cuencas con características similares es imprescindible un estudio previo.
- Ha quedado demostrado que hay cuencas en las que los primeros instantes de los sucesos arrastran la mayor cantidad de contaminantes. En ellas es más factible la construcción de elementos de retención de primer lavado.
- El vertido de metales pesados está asociado directamente con el vertido de sólidos. Las curvas dibujadas son prácticamente paralelas entre si.
- Los valores en concentraciones de Pb arrastrados son inferiores a los señalados como habituales en este tipo de cuenca. Esto puede deberse a la disminución de dicho metal en las emisiones de vehículos automóviles.
- Es necesario el control de la contaminación difusa aportada por las aguas de escorrentía urbana si se quieren proteger con garantías, o restaurar, los usos de los sistemas acuáticos receptores.
- Si bien el comportamiento hidrológico-hidráulico de una cuenca urbana se puede conocer “relativamente” bien con un coste “asumible”, el comportamiento en cuanto a lavado, transporte y transformación de la contaminación durante los sucesos de lluvia precisa de una mayor inversión en esfuerzos y dinero. Esfuerzos y dinero que ya han sido asumidos por otros países hace décadas.

BIBLIOGRAFÍA MÁS RELEVANTE

- 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.
- 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, F.; JÁCOME, A.; PUERTAS, J.; SUÁREZ, J.; (1998); "The early stages in the CSO characterisation in the city of Santiago de Compostela (Spain)"; UDM '98; Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling; 21-24 september; IAWQ, IAHR, UNESCO, vol. 2; 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.
- CAGIAO, J.; VAZQUEZ, F.; PUERTAS, J.; DIAZ-FIERROS, T.; SUAREZ, J.; (1998); "La problemática de los reboses de alcantarillado unitario en entornos urbanos: caso de Santiago de Compostela y su incidencia en la calidad de las aguas del río Sar"; CIMA98; V Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente; 17-20 noviembre (Ciudad La Habana, Cuba).
- ELLIS, J.B.; (1991); "Measures for control and treatment of urban runoff quality"; Rep. DT3PL/FV/JB; Agence de léau Seine-Normandie.
- GUPTA, K.; SAUL, A.J.; (1996); "Suspended solids in combined sewer flows"; *Wat.Sci.Tech.*, 33 (9), pags. 93-99.
- 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,
- 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..
- MOFFA, P.E.; (1990); "Control and treatment of combined sewer overflows" Environmental Engineering Series; Van Nostrand Reinhold; ISBN 0-442-26491-7; Nueva York, 229 págs.
- NOVOTNY, V; WITTE, V.W.; (1997); "Ascertaining aquatic ecological risks of urban stormwater discharges"; *Water Res.* 31, 10; 2573-2585.
- OTV (1994); "Depolluer les eaux pluviales. Contribution a lélaboration dune stratégie." Lavoisier TEC & DOC, Francia, 350 págs., ISBN 2-87777-417-1.
- SAGET, J.D.; CHEBBO, G.; Bertrand-Krajewski, J.L.; "The firts flush in sewer systems"; *Wat.Sci.Tech.*, 33 (9); pags. 101-108.
- 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, J.; PUERTAS, J.; JÁCOME, A.; DÍAZ-FIERROS, T.; DÍAZ-FIERROS V., F.; (1998); "Reboses del alcantarillado en Santiago de Compostela. Su incidencia en la calidad del agua del río Sar"; *Tecnología del Agua*, nº 182, noviembre, ISSN 211/8173, pags. 33-45.
- 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; nº 3352; Madrid; pag. 45-57.