

# EXPERIENCIAS IBEROAMERICANAS EN LA GESTIÓN DE ESCORRENTÍAS CONTAMINADAS DE VIALES

**Editores:**  
**Joaquín Suárez López**  
**Carlos Alfonso Zafra Mejía**  
**Vicente Jiménez Fernández**



## Experiencias iberoamericanas en la gestión de escorrentías contaminadas de viales

SUÁREZ LÓPEZ, Joaquín  [0000-0001-7126-5231](https://orcid.org/0000-0001-7126-5231)

ZAFRA MEJÍA, Carlos Alfonso  [0000-0002-4061-4897](https://orcid.org/0000-0002-4061-4897)

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, Vicente  [0000-0002-2069-9950](https://orcid.org/0000-0002-2069-9950)

A Coruña, 2021

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións

Number of pages: 274

Contents, pages: 1-274

DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498104>

ISBN: 978-84-9749-810-4

Dep. legal: C 1128-2021

### EDICIÓN

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións <<http://www.udc.gal/publicacions>>

© de la edición, Universidade da Coruña (University of A Coruna)

© de los textos, gráficos y figuras, los autores

### MAQUETACIÓN

Teresa Saiz Gómez



Esta obra se edita bajo una licencia Creative Commons

CC BY-NC-SA (Atribución-NoComercial-CompartirIgual) 4.0 Internacional

# **Experiencias iberoamericanas en la gestión de escorrentías contaminadas de viales**

Joaquín Suárez López  
Carlos Alfonso Zafra Mejía  
Vicente Jiménez Fernández

A Coruña  
2021

Servizo de Publicacións  
Universidade da Coruña



## C4.1

### Análisis de la movilización de metales pesados en fase disuelta y particulada en escorrentía de autopistas

Vicente Jiménez Fernández  
Héctor Del Río Cambeses  
Pablo Ures Rodríguez  
Sara Vieito Raña  
Paula M<sup>a</sup> Payo Suárez  
Carlos Temprano Pérez  
Felipe De La Vega Gándaras  
Alfredo Jácome Burgos  
Joaquín Suárez López

#### RESUMEN

Hoy en día ya es conocido que la contaminación de las aguas de escorrentía superficial urbana puede aportar, en cierto tipo de cuencas, cargas de contaminación significativas a los medios acuáticos receptores. En la actualidad, en la Unión Europea, según la Directiva Marco del Agua, las aguas de escorrentía de calles, carreteras y autopistas deben ser consideradas como "presiones" a valorar, por lo que es preciso su análisis con el fin de analizar si generan impactos sobre las masas de agua. El estudio, o caso, que se desea presentar se centra en el análisis de la presencia de metales pesados en las escorrentías de viales con una intensidad de tráfico significativa. Se ha medido la contaminación (DQO, DBO<sub>5</sub>, SS, nutrientes, metales pesados, HAPs) en los flujos de escorrentía (hidrogramas y polutogramas) de una travesía urbana de cuatro carriles con una considerable intensidad de tráfico (18.000 de IMD) que es vertida finalmente a la ría de Ferrol (zona sensible, Galicia, España). A partir de los datos obtenidos se realiza una valoración de las formas en que se presentan los metales pesados y su correlación con otros contaminantes. A partir de estas correlaciones se proponen unos determinados parámetros indicadores de este tipo de contaminación.

**Palabras clave:** Drenaje sostenible, escorrentías urbanas, metales pesados.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día ya es conocido que la contaminación de las aguas de escorrentía urbana puede aportar, en cierto tipo de cuencas, cargas de contaminación significativas a los medios acuáticos receptores. La escorrentía generada a partir de los sucesos de lluvia, disuelve y arrastra los materiales de todo tipo, que se encuentran depositados en las superficies y los transporta hacia las masas de aguas receptoras. Evidentemente, como consecuencia de las diferentes actividades y usos que se realizan en las cuencas, una en estado casi natural, una rural, una urbana o una cuenca industrial, tendrán aguas de escorrentía con muy diferentes tipos y cargas de contaminación.

La problemática que se aborda en esta comunicación se centra en el análisis de la contaminación aportada por las escorrentías de viales con una intensidad de tráfico significativa. En la actualidad, según la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas) y la Instrucción de la Planificación Hidrológica (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica en España) las aguas de escorrentía de calles, carreteras y autopistas deben ser consideradas como “presiones” a tener en cuenta y es preciso su análisis con el fin de analizar si generan impactos sobre las masas de agua. La bibliografía existente sobre este tipo de aguas contaminadas apunta que la problemática principal es por impactos crónicos generados por contaminación por metales pesados.

En una autopista se podrían diferenciar, a priori, dos fuentes de aporte de contaminantes: la contaminación atmosférica y la contaminación procedente de actividades en la superficie (tráfico rodado, erosión de los pavimentos, actividades de jardinería, uso de sal para el deshielo de la nieve, ...). En la Figura 1 se presentan las principales fuentes de contaminación en aguas de escorrentía urbana y en carreteras.

La Empresa Pública de Obras y Servicios Hidráulicos (EPOSH) de la Xunta de Galicia adjudicó el sistema de colectores, tanques de retención y EDAR de Ares, Fene y Mugaros (A Coruña, Galicia) a la UTE formada por las empresas “S.A. de servicios y Obras - COPASA” y “Construcciones Taboada y Ramos, S.L.”. Entre estas actuaciones se consideró de interés realizar algunas actuaciones piloto de control y tratamiento de escorrentías pluviales contaminadas. Se tomó la decisión de estudiar la problemática de uno de los viales de la zona, concretamente un tramo de la vía N-651 (Avenida de las Pías) en la zona “San Valentín” y, en función del grado de contaminación medido, diseñar y construir un sistema de tratamiento. A los sistemas de tratamiento de aguas de escorrentías de autopistas se les denomina “Técnicas de Drenaje Sostenible de Escorrentía de Autopistas” (TDSEA). Para seleccionar, y configurar, una TDSEA adecuada al problema ambiental era necesario analizar cómo se generaban los flujos de agua y cómo se movilizaba la contaminación; con tal fin se realizaron campañas de caracterización.

Pb	Zn	Fe	Cu	Cd	Cr	Ni	Mn	Br	V
				Gasolina con Pb					
				Neumáticos					
				Aceites, lubricantes y grasas					
				Sales de deshielo					
				Acero galvanizado					
				Infraestructuras					
				Carrocería					
				Estructuras de acero					
				motor					
				Revestimientos metálicos					
				Frenos					
				Fungicidas e insecticidas					
				Gases combustión gasoil					
				Asfalto					
				Basura					

Figura 1.- Principales fuentes de contaminación de metales pesados en aguas de escorrentía urbana y en carreteras.

Las actividades principales desarrolladas en el estudio fueron:

- Medición de los caudales generados en la subcuenca de drenaje (hidrogramas).
- Caracterización de la contaminación movilizada mediante la medición de polutogramas asociados a los hidrogramas (sucesos de lluvia).
- Análisis del tipo y características de la contaminación movilizada.
- Análisis de alternativas de tratamiento y configuración de la TDSEA.
- Selección de una alternativa de tratamiento y predimensionamiento.

En esta comunicación se presentan los resultados relacionados con la presencia y forma de metales pesados durante los sucesos muestreados.

## 2. METODOLOGÍA

La cuenca piloto caracterizada en este estudio está formada, en su mayor parte, por la calzada de la carretera nacional N-651, a su paso por la parroquia de San Valentín, en el Ayuntamiento de Fene (A Coruña, Galicia). La vía está configurada en 4 carriles, y dispone de una red de drenaje para las aguas pluviales que vierte finalmente a la ría de Ferrol. Esta ría está declarada “zona sensible” (Directiva UE 91/271) y tiene exigencias de calidad muy altas para cultivos marinos y baño. La IMD es del orden de 18.000 vehículos al día y la capa de rodadura está realizada con aglomerado asfáltico convencional.

La red de alcantarillado para las aguas de escorrentía está formada por unos 2 km de colectores (en su mayoría de hormigón de 400 mm; el diámetro mayor presente es de 600 mm, en algún pequeño tramo final), los imbornales que recogen las escorrentías, los pozos de registro y el desagüe a la ría de Ferrol. La pendiente media de la red de drenaje es alta, del 3,5%, lo cual contribuye a que se registren caudales significativos en

la sección de control, casi al mismo tiempo de ocurrencia de los eventos de lluvia; el tiempo de concentración es muy bajo, del orden de 5 minutos. Este hecho también se ve favorecido por elevado grado de impermeabilización de la cuenca y por el reducido tamaño de la misma. La precipitación media de la cuenca es de 1.250 mm/año.

Tabla 1.- Cálculo de superficie de cuenca de aportación.

TOTAL DE CUENCA (m <sup>2</sup> ) <sup>(1+2)</sup>		44.650
PERMEABLE <sup>(1)</sup>		13.200
IMPERMEABLE <sup>(2) = (3+4)</sup>		31.450
AVDA. DE LAS PÍAS <sup>(3)</sup>		14.530
Otros viales <sup>(4)</sup>		16.920
Coefficiente de escorrentía permeables		0,50
Coefficiente de escorrentía impermeable		0,90
Valor medio ponderado		0,78
SUPERFICIES NETAS	de zonas permeables, 13.200 x 0,50	6.600
	de zonas impermeables, 31.450 x 0,90	28.305
SUPERFICIE NETA TOTAL (ha)		34.905



Figura 2.- En verde se sombrea el área de aportación que es estrictamente un vial de cuatro carriles con alta intensidad de tráfico; se trata del 32% del área total de la cuenca, que también incluye la zona sombreada en azul.

Con el fin de caracterizar los flujos en tiempo de lluvia se instaló una estación de control, que se emplazó en el último de los pozos de registro de la red de drenaje. Los equipos instalados fueron:

- Caudalímetro área-velocidad SIGMA 950 (velocidad por sistema doppler y calado mediante burbuja-presión).
- Tomamuestras automático SIGMA 900 (con 24 botellas de 1 L, programable para toma de muestras con intervalo variable, con cable de conexión con el caudalímetro para recibir señal de arranque por nivel).
- Pluviómetro de intensidad con data-logger TINYTAG PLUS.
- Sistema de comunicaciones por GPRS.

Para la medida de las concentraciones de metales pesados se ha utilizado espectrometría de masas con fuente de plasma de alta resolución (con límite de cuantificación en casi todos ellos de 0,1 µg/L; cromo 0,5 µg/L, mercurio 0,05 µg/L y zinc 1 µg/L). Los HAP se han medido mediante extracción líquido-líquido seguida de SPE (extracción en fase sólida) y determinación por cromatografía de líquidos con detector de fluorescencia programada (HPLC-FL); límite de detección de 0,001 µg/L.

### 3. RESULTADOS

El periodo de explotación de la sección se prolongó durante un año y tres meses, debido a la complejidad de tomar muestras representativas de sucesos de lluvia. Como resumen del registro de caudales realizado se puede destacar que el caudal medio medido en los periodos en los que circulaba agua por la sección de control fue de 1,42 L/s y que el valor del caudal máximo registrado fue de 399,5 L/s.

Se han caracterizado con calidad 10 sucesos de lluvia, pero solo en 8 de ellos se han medido metales pesados, diferenciando fase disuelta y fase particulada. Todos los datos de caracterización de cada suceso de lluvia son organizados y tratados en la denominadas "FICHAS DE SUCESO", con una serie de gráficas y tablas en las que se detallan, de forma resumida, los siguientes valores:

- Referencias y parámetros descriptivos de los sucesos muestreados.
- Concentraciones máximas de los parámetros de contaminación convencionales ( $C_{MAX}$ ).
- Concentraciones medias de suceso de los parámetros de contaminación convencionales (CMS).
- Masas totales de los parámetros de contaminación convencionales movilizadas en cada suceso de lluvia y cargas superficiales específicas.
- Concentraciones máximas de los parámetros de medida de metales pesados totales ( $C_{MAX}$ ).
- Concentraciones máximas de los parámetros de medida de metales pesados en forma disuelta ( $C_{MAX}$ ).
- Análisis del fraccionamiento de los metales pesados medidos en los sucesos de lluvia.
- Concentraciones medias de suceso de los parámetros de medida de metales pesados (CMS).
- Concentraciones máximas de los parámetros de medida de hidrocarburos, y aceites y grasas ( $C_{MAX}$ ).
- Concentraciones medias de suceso de los parámetros de medida de hidrocarburos, y aceites y grasas.

En la tabla 2 se comparan los valores de los resultados obtenidos con distintos valores de estudios de referencia.

Tabla 2.- Comparación de los resultados obtenidos con valores de otros estudios.

PARÁMETRO	CALTRANS		Stockholm Vatten (2001)		Harrison (1991)	Storhaug, R. (1996)	Val. medios CMS	Valoración de presencia
	RANGO	CMS	Bajas	Altas	Autopista	Noruega	FENE	
<b>CONVENCIONALES</b>								
DQO [mg/L]	10 - 390	117,9	25 -60	--	--	--	179,1	ALTA
SDT [mg/L]	14 - 470	109,4	--	--	--	--	85,1	BAJA
SST [mg/L]	3 - 4.800	157,9	< 50	> 175	--	--	237,5	ALTA
<b>METALES (TOTAL)</b>								
Al [µg/L]	29 - 12.600	2.610,3	--	--	--	--	2.200	MEDIA
As [µg/L]	1-17	2,5	--	--	--	--	4,5	ALTA
Cd [µg/L]	0,5 - 378	4,5	< 0,3	> 1,5	2	0,1 - 0,5	0,1	BAJA
Cr [µg/L]	1 - 100	10,9	< 15,0	> 75	--	1 - 170	6,5	BAJA
Hg [µg/L]	--	--	< 0,04	> 0,20	--	0,2 - 1,2	0,1	MEDIA
Cu [µg/L]	1 - 800	48,5	< 9,0	> 45,0	60	6 -120	45,3	MEDIA
Fe [µg/L]	4,1 - 24,0	4.283,5	--	--	--	--	3.545	MEDIA
Pb [µg/L]	1 - 2.300	113,6	< 3,0	> 15,0	100	1 - 33	12,7	BAJA
Ni [µg/L]	0,91 - 317	12,6	< 45,0	> 225	--	3 - 190	6,2	BAJA
Zn [µg/L]	5 - 2.400	227,5	< 60,0	> 300	100	10 - 300	142,6	BAJA
<b>NUTRIENTES</b>								
N <sub>TOTAL</sub> [mg/L]	--	4,83	< 1,25	> 5,0	--	--	3,5	MEDIA
P <sub>TOTAL</sub> [mg/L]	0,05 - 10	0,26	< 0,1	> 0,2	--	--	0,6	ALTA
<b>HIDROCARBUROS</b>								
HAP [µg/L]	--	--	< 1,0	> 2,0	--	0,1 - 2,7	2,6	ALTA

### 3.1. Valoraciones generales

- Los valores CMS de DQO son relativamente más altos en la cuenca piloto de Fene que los datos referenciados por CALTRANS y Stockholm Vatten (2001).
- Se han obtenido también valores más altos de sólidos en suspensión que los de las referencias presentadas.
- Las CMS medidas de los metales pesados indican concentraciones, en general, de valor normal o bajo, a excepción del Arsénico.

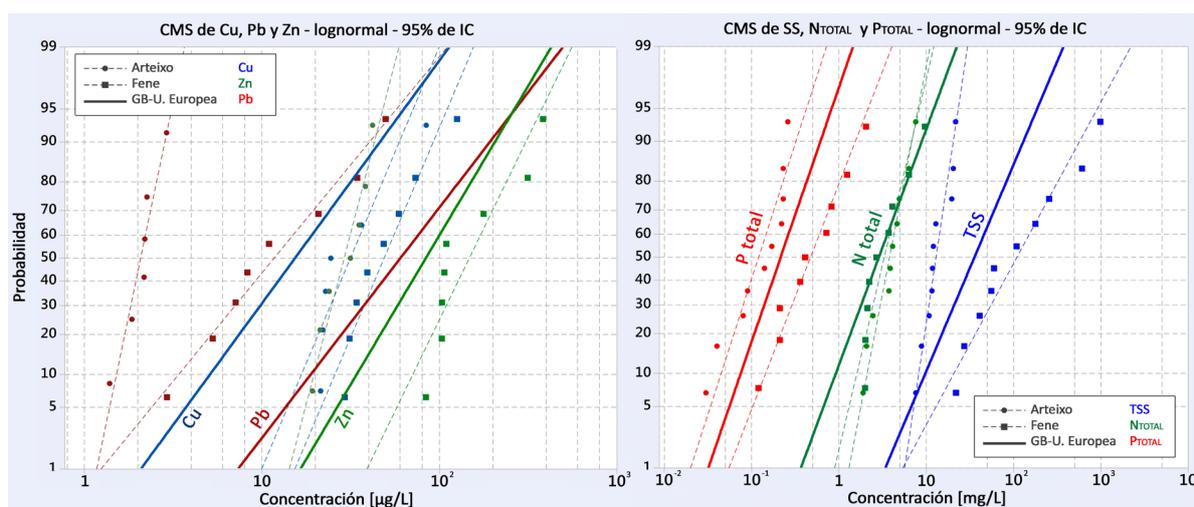


Figura 3.- Comparación de funciones de probabilidad acumulada elaboradas a partir de los valores de CMS de los sucesos medidos en la cuenca piloto con los valores del estudio "The Quality of Urban Stormwater in Britain and Europe: Database and Recommended Values For Strategic Planning Models" (Mitchell, et al.; 2001).

El análisis de la Figura 3 confirma que los valores obtenidos en la cuenca piloto estudiada son bajos en metales pesados y altos en sólidos en suspensión respecto a los de la bibliografía.

Al haber medido la fracción particulada y la fracción disuelta de los metales pesados, tal como se indica en la Figura 4, se puede destacar que metales como Fe, Al, Pb y Cr destacan por presentarse en más de un 90% en forma particulada; destacar también el Mn y el Ni por su alto porcentaje en forma particulada. En forma fundamentalmente disuelta se encuentran el B, el Ba y el Hg (hacer constar que el pH medio medido ha sido de 7,06, con un valor mínimo de 6,44 y un valor máximo de 7,84).

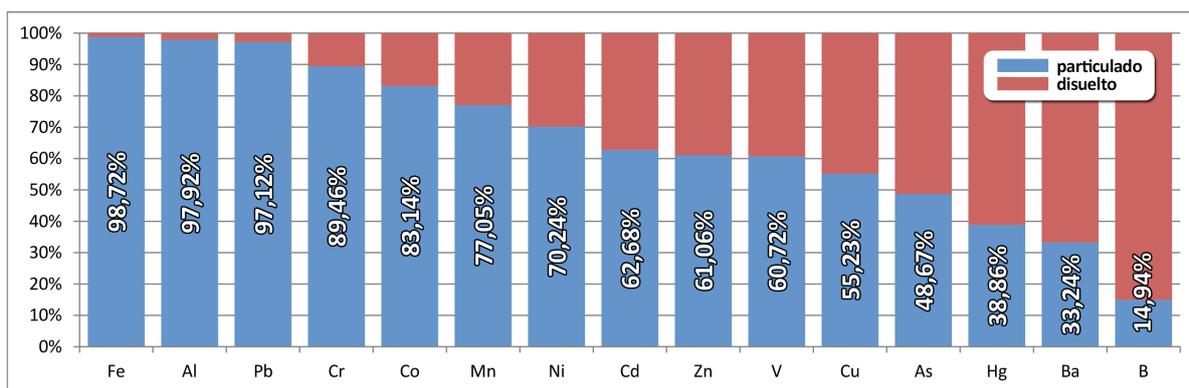


Figura 4.- Fraccionamiento de los metales pesados medidos en la caracterización de los flujos de escorrentía

El que un contaminante de este tipo se presente mayoritariamente en forma particulada hace más factible su eliminación mediante técnicas más sencillas de tratamiento, tales como decantación o filtración.

Con los datos obtenidos de las determinaciones analíticas y de los parámetros elaborados para cada suceso de lluvia ( $C_{MAX}$  y CMS) es posible realizar un tratamiento estadístico del cual extraer unos "parámetros de contaminación indicadores" de las concentraciones y de las cargas del resto de contaminantes que finalmente se envían al medio receptor. Estos "parámetros indicadores" deberían permitir desarrollar dos estrategias: por un lado, medir menos metales pesados, lo que abarataría la caracterización del problema ambiental, y/o, por otro, no medir metales pesados si alguno de los convencionales (por ejemplo la DQO o los sólidos en suspensión) fueran cuantitativamente representativos de las concentraciones de los primeros. Se focalizará el análisis en los siguientes metales pesados: Pb, Hg, Ni, Cr, y especialmente Cd, Cu, Zn (que son los que con mayor frecuencia se utilizan en la legislación y normativas sectoriales); respecto a los parámetros convencionales se hará énfasis en DQO, SST y SDT).

### 3.2. Análisis de correlación de concentraciones de todas las muestras

El análisis estadístico se realiza sobre el total de las 64 muestras, pertenecientes a 8 de los sucesos estudiados en la sección de control de San Valentín en Fene.

En primer lugar se elaboró una matriz de correlaciones que permite detectar aquellos contaminantes que presentan un comportamiento parecido. El número total de

comparaciones de series, combinaciones sin repetición, de 45 elementos tomados de 2 en 2, es  $C_{(45,2)} = 45!/2!/(45 - 2)! = 990$ .

En primer lugar, se analizaron las correlaciones de los parámetros hidrológico-hidráulicos con los parámetros de contaminación, pero se obtuvieron malos resultados (valores de  $R^2$  menores, en general, de 0,5).

El primer contaminante con el que se trabajó fue con los HAP, pero los resultados fueron aún más desfavorables; apenas se consiguieron valores de 0,1 de  $R^2$ .

En una primera aproximación con los metales pesados se valoraron las correlaciones entre los tres metales pesados que se usan como referencia con el resto de los analizados. Del análisis realizado sobre las fracciones particuladas se puede destacar la buena correlación del Cu con el Pb (0,95), con el Ni (0,87), con el Zn (0,87), con el Cr (0,79) y con el Hg (0,66). El Zn particulado correlaciona bien con el Ni (0,94), con el Pb (0,85), con el Cr (0,76) y con el Hg (0,75). Sin embargo, el Cd no correlaciona con ninguno de ellos. Se concluye que bien el Cu o el Zn son buenos indicadores de la presencia del resto de los metales, menos del Cd.

Se realizó el mismo análisis con las fracciones disueltas y el resultado fue muy malo; la "mejor" ha sido una correlación de 0,26 del Cu disuelto con el Zn disuelto.

Se analizaron también las correlaciones entre parámetros convencionales de contaminación (DQO, SST y SDT) con las concentraciones de las diferentes fracciones de los tres metales pesados utilizados como referencia. El Cd sigue sin correlacionar con nada. La DQO correlaciona con el Cu particulado con un coeficiente de 0,67; con el Pb con un valor de 0,65, y con el Zn particulado se queda en un 0,38. Los sólidos en suspensión correlacionan con la fracción particulada del Cu con un 0,82 de coeficiente de determinación, con un valor de 0,82 con Pb, con un valor de 0,70 con el Cr, y con un 0,69 con el Ni particulado. Por su parte los sólidos disueltos, como era de esperar, no correlacionan bien con ninguno de los otros parámetros.

Tabla 3.- Funciones de correlación entre concentraciones de sólidos en suspensión y las fracciones particuladas de los metales pesados caracterizados.

abcisas	ordenadas	Ecuación de regresión	C. determinación	Nº de muestras	(1) Ec. de regresión	(1) C. determinación
SST	Cu <sub>part</sub>	$y = 0,1848x + 7,9658$	$R^2 = 0,8235$	64	$y = 0,2047x$	$R^2 = 0,7925$
SST	Pb <sub>part</sub>	$y = 0,0773x + 2,9146$	$R^2 = 0,8200$	64	$y = 0,0846x$	$R^2 = 0,7964$
SST	Cr <sub>part</sub>	$y = 0,0351x + 2,5478$	$R^2 = 0,7033$	64	$y = 0,0414x$	$R^2 = 0,6280$
SST	Ni <sub>part</sub>	$y = 0,0291x + 1,2948$	$R^2 = 0,6929$	64	$y = 0,0323x$	$R^2 = 0,6650$
SST	As <sub>part</sub>	$y = 0,0180x + 0,8177$	$R^2 = 0,6576$	64	$y = 0,0201x$	$R^2 = 0,6300$
SST	Zn <sub>part</sub>	$y = 0,7181x + 23,3294$	$R^2 = 0,6433$	64	$y = 0,7765x$	$R^2 = 0,6295$
SST	Hg <sub>part</sub>	$y = 5,36 \cdot 10^{-4}x - 0,0115$	$R^2 = 0,4482$	42	$y = 5,11 \cdot 10^{-4}x$	$R^2 = 0,4454$
SST	Cd <sub>part</sub>	$y = 5,43 \cdot 10^{-4}x + 0,0844$	$R^2 = 0,1095$	64	$y = 7,54 \cdot 10^{-4}x$	$R^2 = 0,0559$

(1) ecuaciones de regresión lineal ajustadas al origen de datos

El análisis de las correlaciones de las concentraciones de los metales pesados en fase disuelta con los parámetros convencionales arrojó muy malos valores de  $R^2$  (incluso con los sólidos disueltos totales), no pudiéndose destacar ninguna.

### 3.3. Análisis de correlación de concentraciones de CMS de los sucesos medidos en San Valentín - Fene

El análisis estadístico se ha realizado sobre los valores de CMS de las muestras de 8 sucesos.

Los parámetros hidrológico-hidráulicos, en general, correlacionan relativamente bien con los parámetros de contaminación de interés. Se puede destacar la buena correlación entre los caudales medios y máximos con la mayoría de las CMS de concentración de metales en fase particulada, como se muestra en la Tabla 4. En la misma tabla se puede apreciar que dichas correlaciones empeoran si se utilizan las CMS de la concentración total de metal; solo el Cd y el Pb presentan valores semejantes.

Tabla 4.- Funciones de correlación entre parámetros hidrológico-hidráulicos y fracción particulada de metales pesados caracterizados utilizando los valores de CMS de suceso, y también con la CMS de metal total.

abcisas	orde-nadas	(1) Ecuación de regresión	(1) C. deter-minación	orde-nadas	(1) Ecuación de regresión	(1) C. deter-minación	nº de muestras
Qm	Cu	$y = 3,6677x$	$R^2 = 0,8338$	Cu <sub>total</sub>	$y = 3,9510x$	$R^2 = -0,0477$	8
Qm	Hg	$y = 0,0052x$	$R^2 = 0,7409$	Hg <sub>total</sub>	$y = 0,0076x$	$R^2 = 0,6449$	6
Qm	Cd	$y = 0,0119x$	$R^2 = 0,6832$	Cd <sub>total</sub>	$y = 0,0140x$	$R^2 = 0,7014$	8
Qm	Pb	$y = 1,5534x$	$R^2 = 0,6777$	Pb <sub>total</sub>	$y = 1,5595x$	$R^2 = 0,6658$	8
Qm	Zn	$y = 11,4288x$	$R^2 = 0,5055$	Zn <sub>total</sub>	$y = 12,6686x$	$R^2 = 0,0771$	8
Qm	Cr	$y = 0,6701x$	$R^2 = 0,1354$	Cr <sub>total</sub>	$y = 0,6726x$	$R^2 = 0,0622$	8
Qmáx	Cd	$y = 0,0012x$	$R^2 = 0,8397$	Cd <sub>total</sub>	$y = 0,0015x$	$R^2 = 0,8846$	8
Qmáx	Cu	$y = 0,3559x$	$R^2 = 0,7515$	Cu <sub>total</sub>	$y = 0,3817x$	$R^2 = -0,2050$	8
Qmáx	Hq	$y = 5,05 \cdot 10^{-4}x$	$R^2 = 0,6425$	Hq <sub>total</sub>	$y = 7,55 \cdot 10^{-4}x$	$R^2 = 0,6704$	6
Qmáx	Pb	$y = 0,1501x$	$R^2 = 0,5875$	Pb <sub>total</sub>	$y = 0,1507x$	$R^2 = 0,5736$	8
Qmáx	Zn	$y = 1,0976x$	$R^2 = 0,3928$	Zn <sub>total</sub>	$y = 1,2200x$	$R^2 = -0,0702$	8
Qmáx	Cr	$y = 0,0693x$	$R^2 = 0,3046$	Cr <sub>total</sub>	$y = 0,0694x$	$R^2 = 0,2366$	8

(1) ecuaciones de regresión lineal ajustadas al origen de datos

Tabla 5.- Valores de coeficiente R<sup>2</sup> para Cobre, Zinc y Cromo (concentración total y de fracción particulada).

Total Cu Particulado			Total Zn Particulado			Total Cr Particulado		
Al	0,88	0,98	Pb	0,97	0,98	As	0,92	0,91
Fe	0,84	0,96	Ni	0,96	0,97	V	0,79	0,89
Pb	0,86	0,95	V	0,98	0,97	Ni	0,81	0,87
V	0,81	0,86	Ba	1,0	0,96	Fe	0,86	0,86
Zn	0,84	0,88	Co	0,90	0,92	Co	0,91	0,85
Ni	0,72	0,81	As	0,90	0,91	Al	0,81	0,81
Ba	0,80	0,71	Al	0,90	0,90	Zn	0,73	0,78
Co	0,63	0,65	Fe	0,89	0,89	Mn	0,92	0,75
Cd	0,51	0,61	Cu	0,84	0,88	Cu	0,53	0,70
Mn	0,68	0,51	Mn	0,89	0,80	Ba	0,67	0,69

Son de gran interés las buenas correlaciones de los valores de las CMS de las fracciones particuladas del Cobre y del Zinc con las fracciones particuladas de otros metales pesados, pero hay que señalar también al Cr, como se aprecia en la Tabla 5, tanto para las fracciones particuladas como para la concentración total. Los tres valores, en principio, serían buenos "indicadores trazadores"; además, las CMS son válidas para el cálculo de cargas medias anuales vertidas a partir de eventos discretos de lluvia.

Los valores de CMS de la DQO correlacionan bien con las CMS de las fracciones particuladas del Fe (0,80), del Cr (0,79) y del Al (0,77), pero no tan bien con el Cu (0,69) y con el Zn (0,51). Los sólidos en suspensión tampoco aportan buenas correlaciones con

el Cu (0,59) y con el Zn (0,47); sí que se encuentran mejores correlaciones de los sólidos en suspensión con el Cr (0,80) y el Fe (0,74), por ejemplo. Si finalmente se valoran las correlaciones obtenidas en los valores de CMS de la DQO con las CMS de metal total presente en los sucesos caracterizados se pueden destacar las que se observan con el Cd total (0,84), con el Fe (0,80) y con el Cr (0,79), siendo bajas con el Cu (0,54) y con el Zn (0,50). Respecto a las CMS de los sólidos en suspensión destacan el Cr (0,80), el Cd (0,74) y el Fe (0,74) pero no son nada buenas las correlaciones con el Zn (0,45) o el Cu (0,43).

## 4. CONCLUSIONES

La cuenca piloto caracterizada (vía con intensidad 18.000 vehículos día) genera concentraciones de metales pesados que se podrían caracterizar de medias-bajas para este tipo de flujos contaminados; por el contrario, genera valores de DQO y SST altos (CMS media del lugar de 179 mg/L en DQO, y de 237,5 mg/L en SST).

El análisis de correlaciones realizado sobre los valores de concentraciones de metales en fase particulada obtenidos en todas las muestras tomadas (64) dan como resultado una muy buena correlación entre cuatro metales pesados: Cu, Zn, Cr y Ni. Su presencia conjunta en las aguas de escorrentía se asocia al desgaste de neumáticos y frenos. Se puede destacar también las correlaciones del Pb con los metales pesados citados; actualmente la fuente de plomo se asocia principalmente a los neumáticos.

El análisis basado en todas las muestras tomadas indica que los sólidos en suspensión serían útiles para estimar las cargas de metales pesados, ya que han correlacionado bien con el Cu (0,82), con el Pb (0,82), con el Cr (0,70) y con el Ni (0,69). La bibliografía ya hace referencia a la afinidad de los metales pesados por las fracciones finas del polvo y suciedad presente en las superficies de las cuencas. No se han encontrado correlaciones significativas con ninguna de las fracciones disueltas de los metales pesados en la valoración realizada con las 64 muestras.

Respecto al análisis de posibles correlaciones a partir de los valores de CMS de los sucesos (8) destacar, en principio, las buenas correlaciones del Cu con los caudales medio y máximo del suceso.

Son de gran interés las buenas correlaciones de los valores de CMS del Cobre, el Zinc y el Cromo con el resto de metales pesados. Todos ellos podrían ser buenos "indicadores trazadores", sin embargo, solo el Cromo (total y particulado) correlaciona bien con la DQO (0,79) y los SS (0,80). El Cromo resulta ser el "parámetro conector" entre parámetros básicos o convencionales y los metales pesados. Las principales fuentes de Cromo son los neumáticos y los frenos.

La realización del estudio que se presenta refuerza la necesidad de considerar los impactos que las escorrentías de las vías de alta capacidad generan sobre los medios acuáticos naturales, que si bien ya eran considerados en los documentos de implantación de la DMA, en la práctica no han sido tenidas en cuenta en la elaboración de la planificación ni en los programas de medidas en España.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- CALTRANS (2003). "Construction Site Best Management Practices (BMPs) Manual". State of California Department of Transportation, EE.UU. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/construction/documents/environmental-compliance/csbmp-may-2017-final.pdf>
- STOCKHOLM VATTEN (2001). "Klassificering av dagvatten och recipienter samt riktlinjer för reningskrav. Del 2", Dagvattenklassificering. <https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf1/rapporter/dagvatten/dagvattenklassificeringdel2.pdf>
- MITCHELL, G.; MCDONALD, A.; LOCKYE, J. (2001). "The Quality of Urban Stormwater in Britain and Europe: Database and Recommended Values For Strategic Planning Models". University of Leeds.
- Directiva UE 91/271(1991). "Directiva 91/271/CEE: tratamiento de las aguas residuales urbanas". <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128008>
- DMA (2000). "DIRECTIVA 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2000. Directiva Marco del Agua por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas". <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj?locale=es>
- Orden ARM/2656/2008 (2008), de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE núm. 229, de 22 de septiembre de 2008. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. BOE-A-2008-15340. <https://www.boe.es/eli/es/o/2008/09/10/arm2656>