

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



C5.1

Métodos de estimación de la contaminación de las escorrentías de autopistas. Estudio en dos cuencas piloto

Joaquín Suárez López
Vicente Jiménez Fernández
Alfredo Jácome Burgos
José Anta Álvarez
Pablo Ures Rodríguez
Montserrat Recarey Pérez
José Manuel Álvarez-Campana

RESUMEN

La contaminación por escorrentía de las carreteras y autopistas puede generar importantes impactos en el medio natural debido a las grandes masas que se movilizan en determinadas circunstancias.

Diferentes autores han desarrollado métodos de predicción de las concentraciones y cargas máxicas de contaminantes asociados a la escorrentía urbana e industrial. Asimismo, diferentes países han elaborado metodologías y reglamentos adaptados a sus territorios para determinar esos impactos e imponer, cuando ha sido necesario, sistemas de tratamiento de la escorrentía contaminada.

Este informe se apoya en el trabajo de investigación realizado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del medio Ambiente de la Universidade da Coruña (GEAMA-UDC) para la caracterización de la escorrentía contaminada en dos cuencas piloto y compara los resultados obtenidos con diferentes metodologías de estimación de concentraciones y masas movilizadas de contaminantes utilizadas en varios países.

En este capítulo se presentan los parámetros de los contaminantes (DQO, DBO₅, SS, nutrientes, aceites y grasas, metales pesados y HAP) y los parámetros hidrológico-hidráulicos (hidrogramas y polutogramas) que se midieron en 21 sucesos de lluvia en dos cuencas piloto de Galicia (España).

A partir de los datos obtenidos se han realizado análisis estadísticos para identificar las relaciones entre los diferentes parámetros monitorizados y encontrar aquellos que, al ser menos costosos de obtener, son buenos indicadores de todos los demás ("surrogate constituents" en la bibliografía anglosajona).

Palabras clave: escorrentía, carreteras, contaminación, metales.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua de las escorrentías de las carreteras y autopistas puede llegar a generar impactos significativos sobre el medio natural receptor debido a las importantes masas movilizadas en determinadas circunstancias.

Actualmente en la Unión Europea, de acuerdo con la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), establece que las escorrentías de aeropuertos, vías de transporte, zonas urbanas, zonas industriales, gasolineras, etc., forman parte de las fuentes difusas de contaminación por lo que deben ser consideradas como “presiones” que ponen en riesgo el buen estado de las masas de agua y generan incumplimiento de las normas de calidad ambiental.

Distintos autores han elaborado métodos de estimación/predicción de las concentraciones y las cargas máxicas de contaminantes asociadas a las escorrentías urbanas e industriales, y diferentes países han desarrollado metodologías y normativa adaptada a sus territorios para determinar estos impactos e imponer, en los casos necesarios, sistemas de tratamiento de las escorrentías pluviales contaminadas (Zafra, 2017).

El presente capítulo se apoya en los trabajos de investigación realizados por GEAMA-UDC para la caracterización de escorrentías pluviales contaminadas en una cuenca piloto y se comparan los resultados obtenidos con diferentes metodologías de estimación de concentraciones y masas movilizadas de contaminantes utilizadas en varios países.

Los estudios se centran en el análisis de la presencia de metales pesados en las escorrentías de carreteras con una intensidad de tráfico significativa. Se han medido los parámetros indicadores de contaminantes (DQO, DBO₅, SS, nutrientes, aceites y grasas, metales pesados y HAP) y los parámetros hidrológico-hidráulicos (duración del tiempo seco precedente a cada suceso, DTSP; el caudal máximo registrado en cada suceso, $Q_{máx}$; el caudal medio de cada suceso, Q_{med} ; el volumen de agua movilizado durante el evento, Vol; el tiempo transcurrido hasta alcanzar el $Q_{máx}$, δt_{pl} ; el volumen de primer lavado, VPL; la precipitación total del evento, P y la intensidad cinco-minutal máxima, $I_{5máx}$, entre otros) en los flujos de escorrentía (hidrogramas y polutogramas de contaminantes) en dos cuencas piloto en vías de alta capacidad en la comunidad autónoma de Galicia (España).

Sobre la base de los datos obtenidos se han realizado análisis estadísticos para evaluar las relaciones entre los distintos parámetros monitorizados y encontrar aquellos, que, siendo menos costosos económicamente de obtener, resulten buenos indicadores de todos los demás (“surrogate constituents”).

La ausencia de normativa específica a nivel del Estado Español y de los gobiernos de las comunidades autónomas, hace necesario avanzar en este tipo de estudios para sentar las bases de una normativa que unifique criterios para la valoración de los riesgos de impacto sobre las masas de agua por escorrentías pluviales contaminadas procedentes de viales y, también, oriente sobre cuándo es necesario proceder a someter a las mismas a una gestión específica, que implique procesos de depuración.

2. OBJETIVOS

El objetivo general que se persigue es la elaboración de índices o modelos de predicción de la contaminación movilizada por las escorrentías en las cuencas en tiempo de lluvia a partir de un número reducido de parámetros básicos y/o de los parámetros hidrológico-hidráulicos de las cuencas, y comprobar la validez de los ya existentes y de los recogidos en la normativa de otros países.

3. METODOLOGÍA

Las actividades realizadas para el estudio y el cumplimiento de los objetivos fijados se pueden clasificar en cuatro grupos:

Recopilación y estudio de la documentación existente.

- Actividades de campo: estudio y conocimiento de las cuencas mediante la obtención de cartografía, topografía e información sobre las redes de drenaje y establecimiento y mantenimiento de las secciones de monitorización.
- Trabajo de laboratorio: realización de las determinaciones analíticas y ensayos de parámetros de la contaminación generada en las cuencas en los sucesos de lluvia muestreados.
- Trabajo de gabinete: análisis de caudales y de los flujos de contaminación, análisis del tipo y característica de la contaminación movilizada, parametrización de los sucesos de lluvia, análisis estadístico de los resultados y comparación de los resultados.

Las cuencas analizadas han sido las siguientes:



Figura 1.- Cuencas piloto estudiadas.

- Loureda-Arteixo: situada en el entorno del p.k. 12+000 de la autopista AG-55, A Coruña-Carballo, recoge las escorrentías de una plataforma de 4 carriles y 130 m de longitud (1.526 m²) con una IMD de unos 12.000 vehículos/día.
- San Valentín-Fene (Figura 2): situada en la carretera nacional N-651, se encuentra en San Valentín, ayuntamiento de Fene, recoge las escorrentías de un tramo de

autopista de 130 m de longitud y una plataforma de 4 carriles (48.532 m²), con una IMD de unos 18.000 vehículos/día (Suárez, 2013).



Figura 2.- Cuenca de San Valentín-Fene.

Las secciones fueron instrumentadas con caudalímetros del tipo área-velocidad (HACH SIGMA 950), con equipos tomamuestras automáticos (SIGMA 900) y con pluviómetros.

Se han registrado los parámetros hidrológico-hidráulicos de las cuencas y se han analizado muestras simples y compuestas obtenidas a lo largo de los hidrogramas con el fin de poder obtener polutogramas representativos (Figura 3).

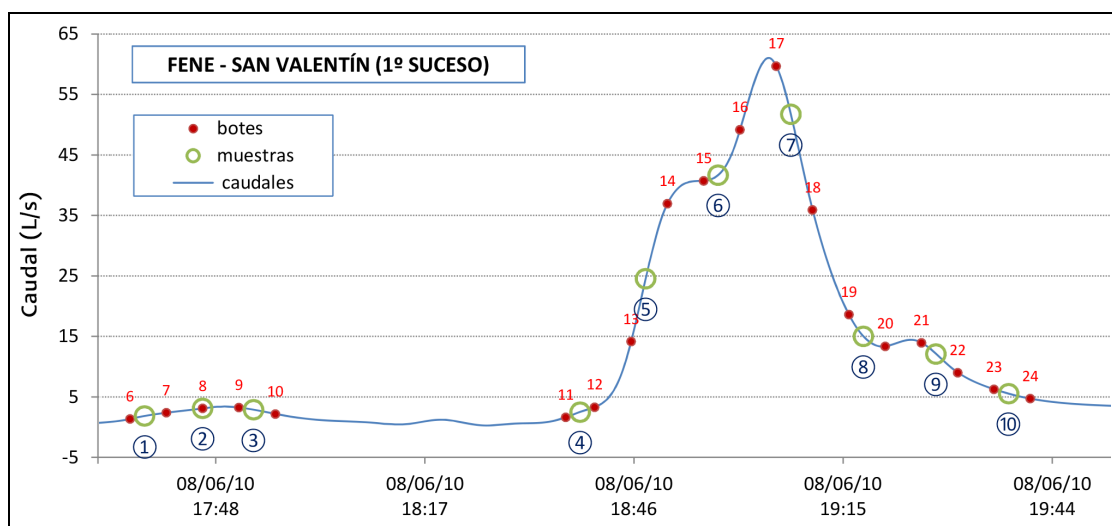


Figura 3.- Detalle de la composición de las muestras sobre el hidrograma de un suceso o evento.

A partir de los resultados de los análisis se han calculado las concentraciones máximas de suceso (CMAX), las concentraciones medias de suceso (CMS), las concentraciones medias de emplazamiento (CME) y las cargas específicas movilizadas por hectárea (CMOV).

El tratamiento estadístico realizado de los datos abarca el análisis de correlaciones y el análisis de datos.

3.1. Análisis de correlaciones

3.1.1 Matrices de correlación

El conocimiento de las correlaciones entre los datos es un aspecto importante a la hora de realizar el análisis de los registros muestreados en un estudio de la contaminación de las escorrentías de aguas pluviales en las carreteras. Las matrices de correlación se convierten en una herramienta muy útil cuando se generan modelos estocásticos ya que permite analizar la dependencia entre las distintas variables.

El coeficiente de correlación entre dos variables indica en qué medida están linealmente relacionadas. Un valor cercano a 1 (en valor absoluto) indica un alto grado de correlación. De este modo, el valor de una variable se podrá predecir a partir del valor de la otra empleando una transformación lineal. Si el coeficiente de correlación es inferior a 0,7 la correlación es leve y por debajo de 0,5 casi inexistente.

3.1.2 Análisis de componentes principales, ACP

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (Figura 4).

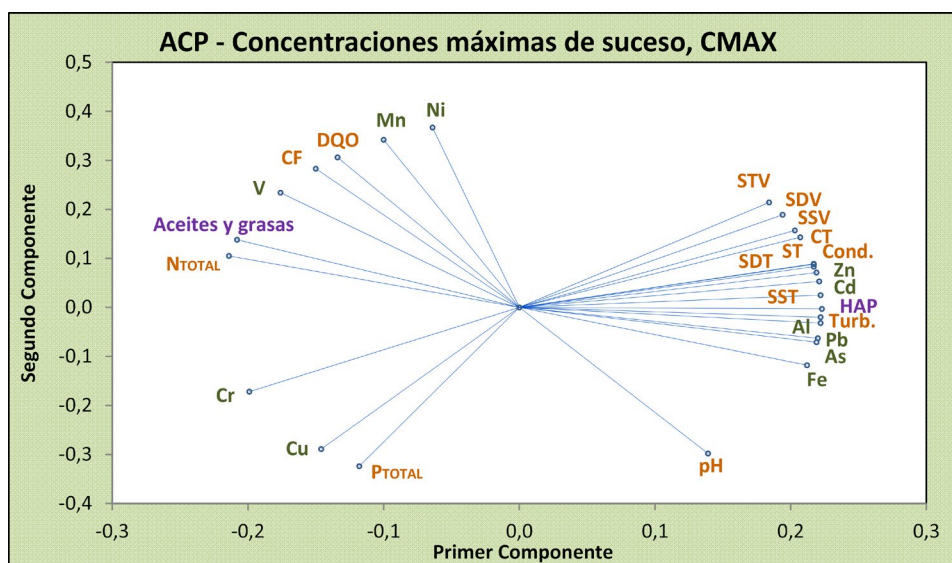


Figura 4.- Gráfica de análisis de componentes principales en la cuenca de Loureda (Arteixo)

3.1.3 Análisis de regresión lineal

Los análisis de regresión lineal simple y múltiple son una herramienta estadística muy popular pero, a menudo, puede emplearse de modo incorrecto. En este sentido, es importante remarcar el hecho de que nunca un análisis estadístico de regresión implica por sí mismo la dependencia causa-efecto entre varios parámetros, pues solamente ofrece correlaciones o tendencias de comportamiento, en algunos casos cuantificables, que señalan la interrelación entre variables presentes en el problema.

3.2. Análisis de datos

El análisis exploratorio de datos (“Exploratory Data Analysis”) es una herramienta rápida para realizar la búsqueda de tendencias o patrones de comportamiento de una serie de datos. Para realizar este tipo de análisis se emplean fundamentalmente herramientas de representación gráfica de datos.

3.2.1 Gráficos de distribución de probabilidad acumulada

En este tipo de representación se refleja el intervalo de variación de un parámetro, la función de distribución que mejor se ajusta a la serie de datos, así como la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor (Figura 5).

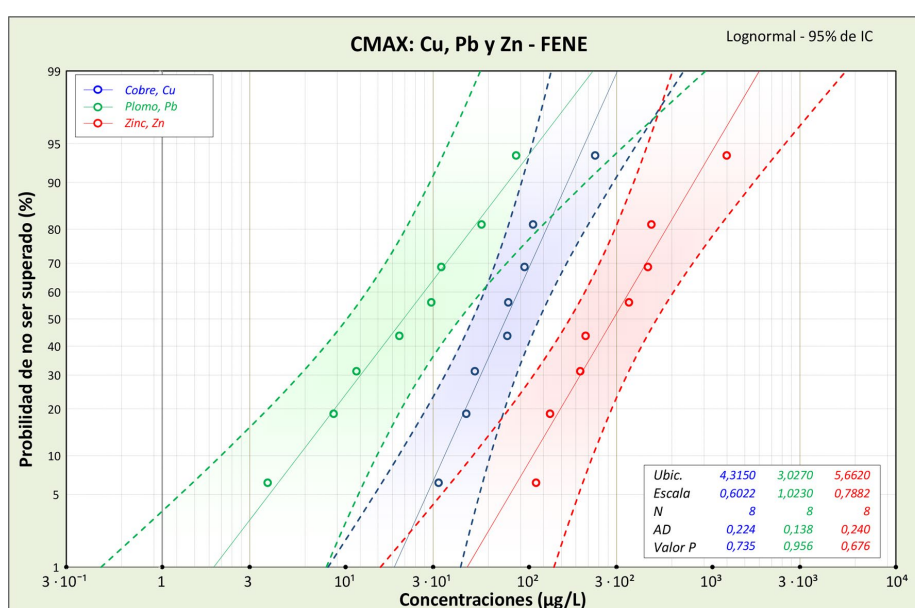


Figura 5.- Gráfica de distribución de probabilidad acumulada en la cuenca de Fene

3.2.2 Gráficas “box-whisker” o diagramas de distribución de datos

Las gráficas tipo “box-whisker” (de cajas y bigotes) son un tipo de representación gráfica que proporciona información sobre la mediana de una distribución de datos, así como la dispersión y simetría de la serie de datos respecto a este valor (Figura 6). Este tipo de representaciones se puede emplear para comparar las concentraciones o cargas movilizadas obtenidas para diferentes parámetros de contaminación, o para un mismo contaminante durante distintas estaciones climáticas en una cuenca o incluso para comparar los resultados obtenidos en distintas cuencas.

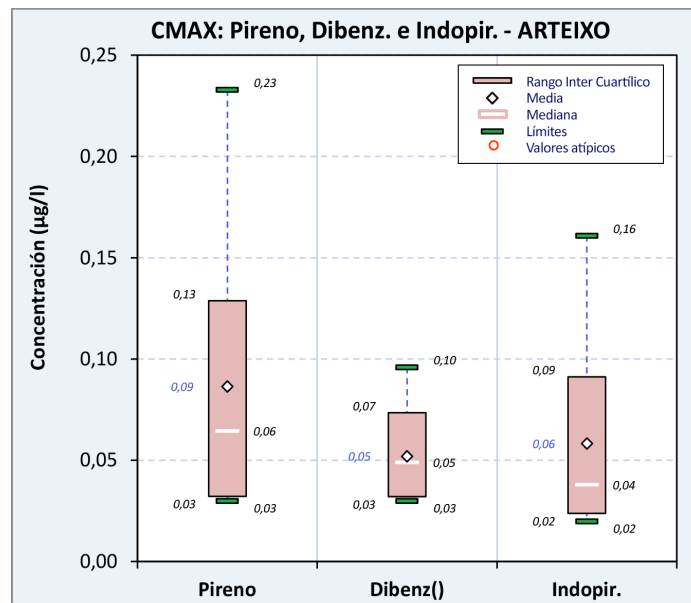


Figura 6.- Gráfica "box-whisker", cuenca de Loureda (Arteixo)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se hace un estudio comparativo con metodologías y normas de otros países.

4.1. Comparación con cuencas estudiadas en Gran Bretaña y en Europa

En la Figura 7 se presenta la comparación entre los datos de este estudio, correspondientes a las cuencas de Arteixo y Fene, con los datos publicados en Hvitved-Jacobsen (1984), que, a su vez, recopilan información de la base de datos de Gran Bretaña y Europa (Mitchell et al., 2001). Se puede apreciar que los parámetros básicos de las cuencas de Arteixo y Fene tienen concentraciones semejantes a los de la referencia.

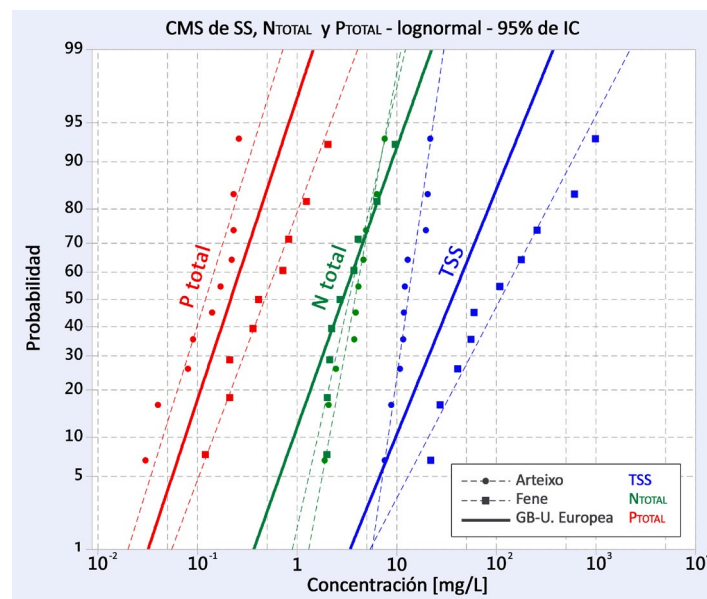


Figura 7.- Gráfica de función de probabilidad acumulada

4.2. Caracterización y predicción de las CMS de los contaminantes en las escorrentías de carreteras en California

Este modelo predice las CMS de los contaminantes en las escorrentías de carreteras en California, desarrollado mediante análisis de regresión lineal, a partir de las siguientes mediciones: precipitación total del evento, tiempo seco precedente, precipitación estacional acumulada, área de drenaje de la cuenca e IMD.

Tabla 1.- Parámetros del modelo de predicción obtenidos en las carreteras de California (Kayhanian et al., 2007).

Parámetro, g	Ln (γ)	Tamaño muestra	R ² ^a	SE ^b	β ₀	P. independientes significativos ^{c,d,e}				
						β ₁	β ₂	β ₃	β ₄	β ₅
Básicos										
SS	Ln (γ)	575	1,01	1,01	4,28	-0,124	0,102	-0,099	—	4,934
SD	Ln (γ)	572	0,73	0,73	4,73	-0,309	0,126	-0,050	—	2,582
COD	Ln (γ)	590	0,61	0,61	4,11	-0,404	0,123	-0,129	—	—
COT	Ln (γ)	583	1,09	1,09	5,23	-0,209	0,129	-0,154	—	—
Metales (total)										
Cu, total	Ln (γ)	582	0,72	0,72	2,90	-0,161	0,163	-0,079	—	6,823
Pb, total	Ln (γ)	586	1,18	1,18	2,72	—	—	-0,102	—	9,650
Ni, total	Ln (γ)	557	0,67	0,67	2,51	-0,196	0,141	-0,075	-0,155	1,013
Zn, total	Ln (γ)	579	0,76	0,76	4,83	-0,227	0,143	-0,084	—	6,747
Metales (disueltos)										
Cu, disuelto	Ln (γ)	581	0,62	0,62	2,92	-0,290	0,185	-0,102	—	3,679
Pb, disuelto	Ln (γ)	376	1,15	1,15	2,04	-0,248	—	-0,101	—	0,007
Ni, disuelto	Ln (γ)	474	0,57	0,57	2,73	-0,270	0,068	-0,107	-0,094	—
Zn, disuelto	Ln (γ)	577	0,79	0,79	4,74	-0,343	0,164	-0,112	—	1,676
Nutrientes										
NO ₃ -N	Ln (γ)	529	0,38	0,38	1,30	-0,417	0,092	-0,090	—	2,870
P, total	Ln (γ)	520	0,78	0,78	-	-0,143	0,128	-0,051	—	0,900
NKT	Ln (γ)	537	0,66	0,66	1,70	-0,343	0,102	-0,128	—	1,535

^a R² = Error cuadrático medio.

^b SE = El umbral estadístico de significancia es p > 0,05.

^c Parámetros independientes.

^d "—" Indica que la variable no es significativa o que se excluyó del modelo por problemas de colinearidad.

^e El signo positivo o negativo de los coeficientes indica la tendencia a aumentar o disminuir la concentración de contaminantes.

En la tabla anterior se encuentran los valores obtenidos por Kayhanian, et al. (2007), para cada una de las variables consideradas, de acuerdo con la fórmula.

$$(CMS) = \beta_0 \pm a\beta_1 \pm b\beta_2 \pm c\beta_3 \pm d\beta_4 \pm e\beta_5 \quad (1)$$

a = precipitación total del evento (mm); *b* = tiempo seco precedente (días); *c* = [precipitación estacional acumulada (mm)]^{1/3}; *d* = área de drenaje (ha); *e* = tráfico (IMD·10⁻⁶).

En la Tabla 2 se muestran resultados parciales de las CMS obtenidas en Fene mediante este método y las reales obtenidas en las campañas de campo.

Tabla 2.- Resultados del modelo de predicción de las CMS en la cuenca de Fene.

Fene M.K.	SUCEOS								
	01	02	04	05	06	07	08	09	10
SS	108,30 4,91	40,86 60,69	59,72 16,66	21,90 23,98	27,21 47,55	55,59 46,85	255,84 16,40	177,66 15,99	607,58 13,02
SD	62,21 1,34	70,99 81,23	66,09 26,26	154,52 36,34	64,47 58,24	84,72 88,45	65,07 10,11	82,82 4,36	101,00 1,00
Cu tot	48,59 1,05	39,24 46,12	31,18 5,23	29,29 9,63	— 31,45	59,08 27,68	73,35 6,37	34,15 7,42	125,68 7,14
Cu dis	9,29 0,15	23,34 21,85	12,34 2,55	20,33 4,68	— 13,85	39,49 16,18	12,54 1,68	7,23 1,14	2,30 0,47
Pb tot	20,82 4,98	5,28 4,98	7,11 4,98	2,92 4,98	— 4,98	8,29 4,98	34,42 4,98	10,97 4,98	49,79 4,98
Pb dis	0,28 0,09	0,01 0,46	0,59 0,97	0,05 0,80	— 0,44	0,09 0,88	— 0,22	— 0,06	0,07 0,01
Ni tot	8,29 0,00	3,73 0,08	3,67 0,01	2,77 0,02	— 0,05	4,07 0,06	15,76 0,01	5,21 0,01	15,86 0,01
Ni dis	1,37 0,01	1,84 0,09	1,09 0,07	1,90 0,08	— 0,08	— 0,13	— 0,02	— 0,01	0,09 0,00
Zn tot	177,45 2,94	109,41 140,28	106,63 26,87	83,98 42,88	— 98,57	103,29 112,02	314,48 19,10	103,48 13,98	383,69 6,92
Zn dis	24,84 0,40	74,50 57,56	33,43 11,08	41,50 17,73	— 37,77	47,43 55,14	18,93 4,56	27,04 2,08	31,23 0,49
P tot	0,36 0,03	0,21 0,60	0,21 0,11	0,12 0,18	— 0,44	0,41 0,42	0,72 0,12	0,82 0,12	2,04 0,11

Con el modelo de predicción de las CMS de los contaminantes en las escorrentías de carreteras en California se han obtenido resultados muy poco satisfactorios en las cuencas estudiadas.

4.3. Cálculo de cargas contaminantes según la normativa francesa del Sétra (2006)

El modelo parte de la asignación de unas cargas unitarias anuales para diversos contaminantes (SS, DQO, Zn, Co, Cd, HCT y HAP) y considerando las variables de IMD, precipitación anual, superficie impermeable y tipo de emplazamiento (abierto o cerrado) permite hacer pronósticos de las cargas anuales, las CMS y las concentraciones durante un evento punta de precipitación.

El punto de partida es la asignación de cargas unitarias anuales por hectárea impermeable y 1.000 vehículos/día, según las siguientes tablas:

Tabla 3.- Cargas unitarias anuales por ha impermeable y 1.000 vehículos/día (Sétra, 2006).

Carga unitaria anual por ha impermeable y 1.000 vh/día, Cu	SS (kg)	DQO (kg)	Zn (kg)	Cu (kg)	Cd (g)	HCT (g)	HAP (g)
Abierto	40	40	0,4	0,02	2	600	0,08
Con limitaciones	60	60	0,2	0,02	1	900	0,15

Tabla 4.- Cargas adicionales cuando la IMD > 10.000 vehículos/día (Sétra, 2006).

Carga adicional para IMD > 10.000 vh/día, Cs	SS (kg)	DQO (kg)	Zn (kg)	Cu (kg)	Cd (g)	HCT (g)	HAP (g)
Abierto y con limitaciones	10	4	0,0125	0,011	0,3	400	0,05

En la tabla siguiente se muestran los resultados comparados de la cuenca de Fene.

Tabla 5.- Comparación de las concentraciones medias calculadas según el método del Sétra (2006) con las CMS de Fene.

		MES (mg/L)	DQO (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Cd (µ/L)	HCT (µ/L)	HAP (µ/L)
Concentración media, Cm	Abierto	58,95	53,21	0,51	0,04	2,76	1.123,41	0,15
	Con limitaciones	83,64	77,90	0,26	0,04	1,52	1.493,78	0,23
CME medida		408,24	361,37	0,26	0,08	0,29	249,68	2,12

Aplicando este método a las cuencas estudiada se obtienen resultados dispares, Tabla 5. Las predicciones resultan muy bajas para SS, DQO, Cu y HAP y altas para el Cd y los HCT.

4.4. Recomendaciones de la “Asociación Alemana de Aguas, Aguas Residuales y Residuos” (DWA) para el tratamiento de escorrentías

La DWA considera que la composición de las escorrentías en las zonas pavimentadas depende de la contaminación atmosférica, de los usos del suelo y del régimen de precipitaciones y según su criterio el esfuerzo para determinar la relación entre las concentraciones de los contaminantes y sus fuentes de origen puede resultar desproporcionado a los efectos prácticos de planificación, por lo que ha establecido un procedimiento sencillo para determinar la necesidad de instalar un sistema de tratamiento de las aguas de escorrentía, el cual sigue el esquema de la siguiente figura.

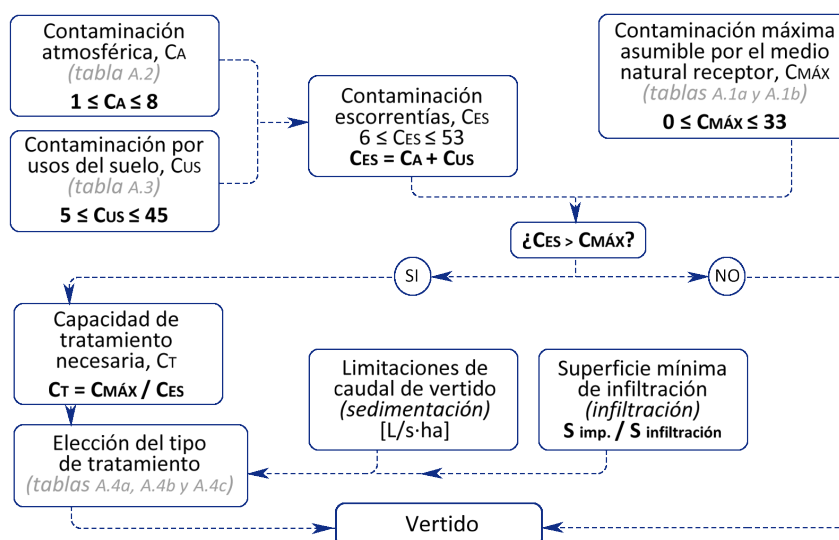


Figura 8.- Procedimiento de la DWA-M 153E (2007).

En el caso de la cuenca de Fene la valoración de la presión, como se muestra en la Tabla 6, es la suma de la contaminación proveniente de la atmósfera (entre 4 y 8 puntos) y la proveniente del suelo (entre 35 y 45 puntos) que en total suman entre 39 y 53 puntos. Esta puntuación es superior a los 33 puntos de capacidad del medio receptor (Tabla 7) por lo que las escorrentías deberían tratarse antes de su vertido a la ría de Ferrol.

Tabla 6.- Valoración DWA de la influencia de la contaminación atmosférica del aire y de la debida a los usos del suelo en la cuena de Fene.

Contaminación	Cargas contaminantes provenientes de la atmósfera	Tipo	Puntos
Alta	Zonas urbanas con mucho tráfico (IMD > 15.000 vh/día)	Air3	4
	Zonas urbanas con calefacciones de combustibles domésticos (v.gr. madera o carbón)	Air4	8
Contaminación	Cargas contaminantes provenientes los usos del suelo	Tipo	Puntos
Alta	Autopistas y carreteras con mucho tráfico (IMD > 15.000 vh/día)	F6	35
	Accesos a polígonos industriales con mucho tráfico pesado y zona similares	F7	45

Tabla 7.- Clasificación parcial de los cuerpos de agua (DWA-M 153E, 2007).

Capacidad del medio natural receptor			
Cuerpo de agua	Ejemplos	Tipo	Puntos
Mar	Regiones costeras de mar abierto	G1	33
Cursos de agua	Grandes ríos (caudal > 50 m ³ /s)	G2	27
	Ríos pequeños (anchura superficial > 5 m)	G3	24
Aguas estancadas y sumergidas	Grandes arroyos subterráneos de alta montaña	G9	14
	Grandes arroyos subterráneos de zonas bajas	G10	12
	Pequeños lagos y estanques (superficie < 500 m ²)	G11	10
	Pequeños arroyos subterráneos		
Aguas subterráneas	Fuera de las zonas de captación de agua potable	G12	10
	Zonas kársticas sin conexión con las zonas de captación de agua potable	G13	8

La aplicación de las recomendaciones de la DWA es rápida, sencilla y acorde con los resultados obtenidos, pero no hace estimaciones de concentraciones o cargas de contaminantes.

4.5. Tratamiento de escorrentías de carreteras en Inglaterra, recomendaciones del CIRIA

En la publicación CIRIA Report 142, (Luker et al., 1994), se aborda el estudio y puesta en práctica de sistemas de drenaje para el control de la contaminación de las escorrentías de carreteras, como complemento a la normativa de drenaje del Reino Unido, que sólo lo regula desde el punto de vista de la hidráulica, sin considerar las normas de calidad del medio receptor.

En el estudio del CIRIA se clasifican las sustancias contaminantes en 6 grupos: sedimentos, metales, hidrocarburos, sales y nutrientes, microbiología y otros (PCBs, herbicidas, etc.) y, partiendo de los valores reflejados en estudios de diversos autores, hace unas estimaciones de las cargas (kg/ha/año) que cabe esperar, en función de la IMD (Tabla 8).

Tabla 8.- Cargas características anuales (kg/ha/a) decontaminantes (Luker et al., 1994).

IMD	ST	DQO	NH ₄ -N	Cu		Zn	
				Total	Disuelto	Total	Disuelto
<i>vh/día</i>	<i>Kg/ha/a</i>						
< 5.000	2.500	250	4,00	0,40	0,20	0,40	0,20
5.000 – 15.000	5.000	400	4,00	0,70	0,30	1,00	0,50
15.000 – 30.000	7.000	550	4,00	1,00	0,40	2,00	1,00
> 30.000	10.000	700	4,00	3,00	1,20	5,00	2,50

El proceso para determinar las cargas contaminantes y la necesidad de tratar las aguas de escorrentías es más complejo que en los casos de la DWA o del Sétra, anteriormente vistos.

Como parte de ese proceso en el informe del CIRIA se hacen unas estimaciones de las cargas características anuales (kg/ha/año), que para el caso de la cuenca de Fene son los siguientes (Tabla 9):

Tabla 9.- Cargas características anuales (kg/ha/a) de contaminantes en Fene.

	IMD	ST	DQO	NH ₄ -N	Cu		Zn	
					Total	Disuelto	Total	Disuelto
	<i>vh/día</i>	<i>Kg/ha/a</i>						
CIRIA	15.000 – 30.000	7.000	550	4,00	1,00	0,40	2,00	1,00
SÉTRA	—	—	1.489	—	0,04	—	14,15	—
Fene	—	—	2.179	—	0,04	—	7,24	—

Tomando como referencia las cargas de contaminación anuales en la cuenca de Fene calculadas con el método del Sétra se observa que las estimaciones del CIRIA se quedan muy por debajo.

Considerando que los valores de las concentraciones de los contaminantes estudiados en la cuenca de Fene son sensiblemente superiores a los determinados por el método del Sétra, el cual, a su vez, hace pronósticos de cargas bastantes superiores a los del CIRIA, cabe concluir que las estimaciones del CIRIA se quedan muy por debajo de las observadas en la cuenca de Fene.

Tras un amplio estudio de la metodología y normativa de diferentes países se puede concluir que en todos los casos se tienen en consideración las escorrentías de carreteras como fuente de contaminación que puede llegar a afectar significativamente al medio natural receptor.

En cuanto a la validez de los métodos de determinación de las cargas contaminantes los resultados son dispares y poco recomendables para su aplicación a las dos cuencas estudiadas.

4.6. Estudio de correlaciones entre parámetros

El tratamiento estadístico de las cuencas estudiadas no produjo buenas correlaciones entre los parámetros hidrológico-hidráulicos y parámetros de contaminación entre las dos cuencas distintas estudiadas.

No obstante, los resultados son muy distintos cuando se estudian las cuencas de forma independiente. En este caso el tratamiento estadístico ha permitido encontrar parámetros de contaminación de las aguas cuyas concentraciones pueden resultar indicativas de las de los demás parámetros. Con los parámetros hidrológico-hidráulicos ocurre otro tanto.

Destacar en este apartado alguna de las correlaciones más importantes, y quizás más útiles, encontradas, que parten de los denominados parámetros indicadores o "parámetros guía".

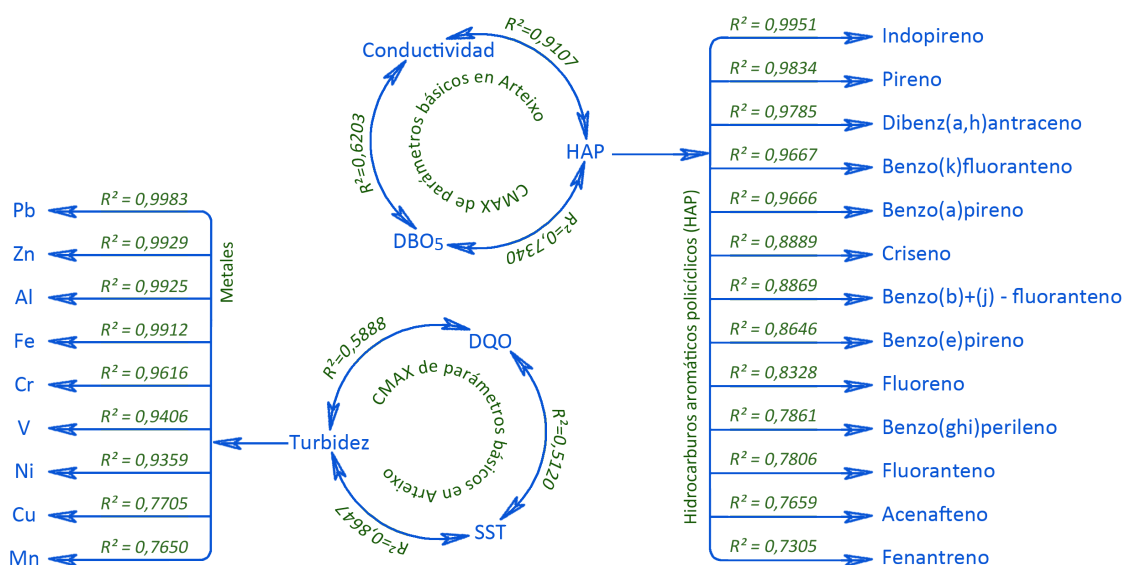


Figura 9.- Parámetros guía para las concentraciones máximas, CMAX, en la sección de Arteixo.

En la figura anterior se muestra de forma resumida una síntesis de las relaciones estudiadas. Partiendo de las CMAX de parámetros básicos como la turbidez (a su vez con buenas correlaciones con la DQO y los SST) se pueden hacer predicciones de las CMAX de los metales en la cuenca de Arteixo. También, la buena correlación de las CMAX de los HAP con las de la DBO₅ y la conductividad permite realizar predicciones de los mismos partiendo de las CMAX de parámetros básicos. La estimación de las CMAX de aceites y grasas está limitada a un par de parámetros guía en el grupo de los metales (Figura 10).

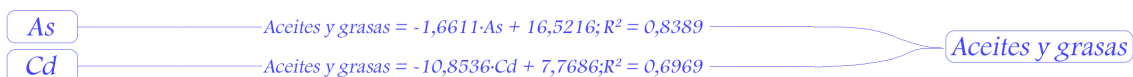


Figura 10.- Parámetros guía para las CMAX de aceites y grasas en la sección de Arteixo.

De igual forma en la cuenca de Fene se han encontrado buenas correlaciones, como por ejemplo las de las CMS, resumidas en la siguiente figura.

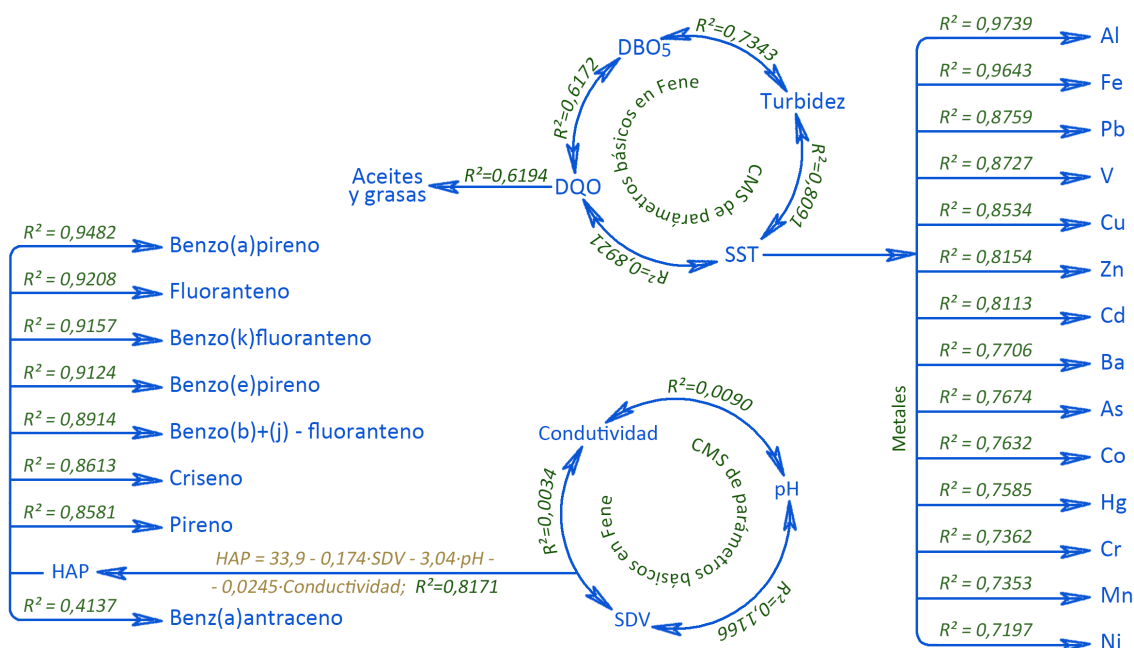


Figura 11.- Parámetros guía para las concentraciones medias de suceso, CMS, en la sección de Fene.

Las CMS de los SST tienen muy buena correlación con las de los metales y con las de la DQO, las cuales tienen buena correlación con las de los aceites y grasas. Las CMS de los SST y de la DQO también tienen buenas correlaciones con las de otros parámetros básicos como la DBO₅ y la turbidez. La predicción de las CMS de los HAP se puede realizar a partir de una correlación lineal múltiple con las CMS de los parámetros básicos: SDV, pH y conductividad.

En la Figura 12 se muestran las mejores correlaciones obtenidas entre CMOV y parámetros hidrológico-hidráulicos en Arteixo. Destacar las buenas correlaciones entre DQO y SST con el volumen total de agua durante el periodo de muestreo. Los HAP correlacionan bien con la I_{total}. Finalmente comentar, aunque no se muestra en la figura, que la CMOV de DQO tiene una correlación aceptable, $R^2 = 0,65$, con la duración de tiempo seco precedente (DTSP).

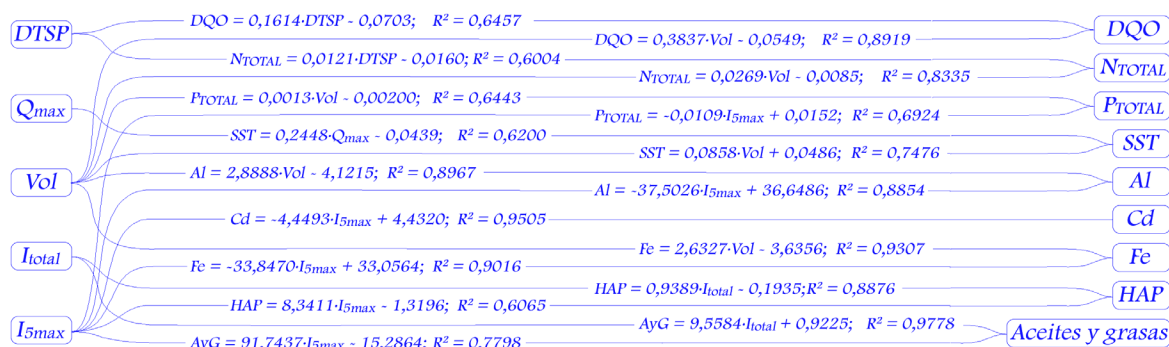


Figura 12.- Parámetros hidrológico-hidráulicos indicadores de las CMOV de los contaminantes en la sección de Arteixo.

Tabla 10.- Coeficientes de determinación, R^2 , de las correlaciones de las CMOV de los parámetros básicos, metales y Aceites y grasas con los parámetros hidrológico-hidráulicos en la sección de Fene.

	DBO ₅	DQO	N _{TOTAL}	ST	SST	Al	Fe	Pb	Aceites y grasas
Qmax	0,9387	0,9249	0,9598	0,9489	0,9331	0,9541	0,9626	0,9414	0,9508
Qmed	0,9338	0,9476	0,9217	0,9377	0,9474	0,9557	0,9486	0,9730	0,9240
I5max	0,8697	0,8972	0,8804	0,9159	0,9231	0,9565	0,9557	0,9605	0,9303
Vol	0,8481	0,8137	0,8929	0,8657	0,8299	0,8451	0,8667	0,8025	0,8698
ltotal	0,7197	0,7082	0,7574	0,7565	0,7294	0,7382	0,7543	0,7219	0,8396
VPL	0,7090	0,7496	0,6861	0,7311	0,7495	0,7557	0,7418	0,7956	0,9024

Las correlaciones de los metales pesados que se presentan en forma particulada (Al, Fe y Pb) van acompañando a las de los SS, como era de esperar.

Como conclusión se puede decir que a partir del estudio inicial de unos pocos sucesos de lluvia se pueden hacer buenas predicciones de las cargas contaminantes en una cuenca de carretera.

Los principales parámetros que se utilizan en el control de la contaminación de escorrentías de viales son los SS, la DQO, y los metales pesados Cu, Pb y Zn. Las correlaciones obtenidas en los estudios realizados permiten trabajar midiendo los sólidos en suspensión y obtener de forma bastante precisa el resto de los contaminantes indicados.

A falta de estos estudios se pueden utilizar, con precaución, los diferentes estudios o normas internacionales, resultando especialmente prácticas las recomendaciones de la norma alemana DWA-M 153E (2007).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- DWA (2007). "Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Advisory Leaflet DWA-M 153E. Recommended Actions for Dealing with Stormwater". Vol. DWA-M 153E, pp. 35; Hennef (Alemania): German Association for Water, Wastewater and Waste. <https://en.dwa.de/en/publications.html>
- HVITVED-JACOBSEN, T.; VOLLERTSEN, J.; NIELSEN, A. (2010). "Urban and Highway Stormwater Pollution. Concepts and Engineering". Boca Raton: CRC Press.
- JIMÉNEZ, V. (2016) "Implantación de técnicas de drenaje sostenible de escorrentías de autopistas (TDSEA) en la Comunidad Autónoma de Galicia". Tesis doctoral. <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1196613>
- KAYHANIAN, M.; SUVERKROPP, C.; RUBY, A.; TSAY, K. (2007). "Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration". Journal of Environmental Management, 85(2), 279-295. DOI: [10.1016/j.jenvman.2006.09.024](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.024)
- LUKER, M.; MONTAGUE, K. (1994). "Control of Pollution from Highway Drainage Discharges Report 142 (1997 ed.)". London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- 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.
- OPHER, T.; FRIEDLER, E. (2010). "Factors affecting highway runoff quality". Urban Water Journal, 7(3), 155-172. DOI: [10.1080/15730621003782339](https://doi.org/10.1080/15730621003782339)
- SÉTRA (2006). "Calcul des charges de pollution chronique des eaux de ruissellement issues des plates-formes routières". Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Francia. <http://catalogue.setra.fr/documents/Cataloguesetra/0004/Dtrf-0004143/DT4143.pdf>
- SUÁREZ, J.; JIMÉNEZ, V.; DEL RÍO, H.; ANTA, J.; JÁCOME, A.; TORRES, D.; URES, P.; VIEITO, S. (2013). "Design of a sand filter for highway runoff in the north of Spain". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer. Volume 166, Issue 2, June, pp. 121-129. DOI: [10.1680/muen.12.00028](https://doi.org/10.1680/muen.12.00028)
- ZAFRA, C.; TEMPRANO, J.; SUÁREZ, J. (2017). "A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff from road-deposited sediments". Sci. Total Environ, Vol. 601-602, 1, Pages 260-270, Elsevier. DOI: [10.1680/muen.12.00028](https://doi.org/10.1680/muen.12.00028)