

Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía

Contamination by urban superficial runoff: accumulated heavy metals on a road surface

Carlos Alfonso Zafra Mejía,¹ Javier Temprano González² y Juan Ignacio Tejero Monzón³

RESUMEN

El estudio del comportamiento de la contaminación acumulada sobre las superficies urbanas es importante para diseñar métodos de control que minimicen los impactos de la escorrentía superficial sobre el medio ambiente. En este artículo se presentan los datos del sedimento recolectado sobre la superficie de una vía urbana, en la ciudad de Torrelavega, al norte de España, durante un período de 65 días, en el que se recolectaron 132 muestras. El sistema de recolección del sedimento distinguió dos tipos de muestras: la aspirada directamente en seco, *carga libre*, y la barrida después del aspirado, *carga fija*. Los resultados mostraron que la concentración de metales pesados en el sedimento recolectado (Pb, Zn, Cu y Cd), era inversamente proporcional al diámetro de la partícula. Se encontraron elevadas concentraciones de metales pesados en la fracción menor de 63 μm . Se calcularon ecuaciones de regresión para la concentración de los metales pesados en función del diámetro de la partícula. Se hallaron grandes cargas de metales pesados en las fracciones mayores de 125 μm . Los resultados proveen información para el análisis de la calidad del agua de escorrentía en zonas urbanas y el diseño de estrategias de tratamiento.

Palabras clave: metales pesados, escorrentía superficial urbana, suciedad urbana, carga superficial, concentración, sedimento, granulometría.

ABSTRACT

Studying the behaviour of accumulated contamination on urban surfaces is important in designing control methods minimising the impacts of surface runoff on the environment. This paper presents data regarding the sediment collected on the surface of an urban road in the city of Torrelavega in northern Spain during a period of 65 days during which 132 samples were collected. Two types of sediment collection samples were obtained: vacuumed dry samples (free load) and those swept up following vacuuming (fixed load). The results showed that heavy metal concentration in the collected sediment (Pb, Zn, Cu and Cd) was inversely proportional to particle diameter. High heavy metal concentrations were found in the smaller fraction (63 μm). Regression equations were calculated for heavy metal concentration regarding particle diameter. Large heavy metal loads were found in the larger fraction (125 μm). The results provide information for analysing runoff water quality in urban areas and designing treatment strategies.

Keywords: heavy metals, urban superficial runoff, urban dirt, superficial load, concentration, sediment, particle sized distribution.

Recibido: agosto 16 de 2007

Aceptado: enero 25 de 2007

Introducción

La contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas, ya que se ha demostrado que contiene grandes cantidades de los mismos tipos de contaminantes que se encuentran en las

aguas residuales urbanas. Se requiere estimar la carga contaminante sobre las superficies impermeables para estudiar los impactos en los sistemas de drenaje y aguas receptoras, y para diseñar métodos de minimización. La escorrentía

¹ Ingeniero civil. Especialista, Ingeniería Ambiental, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc., Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Doctorado investigador, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, España. Profesor, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. carlos-alfonso.zafra@alumnos.unican.es

² Ingeniero de caminos, canales y puertos. Ph.D., en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, España. Profesor, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, España. tempranoj@unican.es

³ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Ph.D. en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, España. Profesor, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, España. tejeroi@unican.es

urbana se considera como una fuente de contaminación de difícil localización, ya que se origina en áreas extensas; su vertido es intermitente, ligado a un fenómeno aleatorio, la lluvia, variable en el tiempo, difícil de muestrear, en origen y relacionada con el uso del suelo.

A principios de los años setenta se inició la modelización de la calidad del agua de escorrentía, y desde entonces, se han propuesto muchos modelos. A pesar de que la disponibilidad de la contaminación sobre las superficies es una variable usada en los modelos existentes, no se ha logrado impulsar el desarrollo de una cantidad suficiente de estudios sobre acumulación desde el elaborado por Sartor y Boyd en 1972. Dichos modelos usan básicamente los conceptos de acumulación y lavado de la carga superficial.

Las cargas contaminantes de la escorrentía superficial urbana son producto de la acumulación de los contaminantes entre dos lluvias consecutivas. Estas cargas por lo general tienden a un valor máximo de equilibrio. En el tiempo seco previo a un evento de lluvia intervienen la eliminación por la acción del viento y por las corrientes de aire generadas por el tráfico, adsorción y oxidación de químicos de un estado a otro, etc. (Asce, 1992). La acumulación de la suciedad sobre una superficie se estima en función del número de días de tiempo seco como una función lineal, potencial, exponencial, o Michaelis-Menton. La intensidad de la lluvia, las características de las superficies de las calles y el tamaño de las partículas son los factores de los que depende la velocidad con que la lluvia lava el polvo y la suciedad acumulada sobre las vías. Además, las superficies impermeables pueden erosionarse por efectos como el impacto directo de la gota de lluvia, el lavado por la escorrentía superficial y la erosión por reacciones químicas (Novotny, 1991).

Las concentraciones de los contaminantes en las vías son generalmente superiores a las que ocurren en áreas comerciales y residenciales. Los contaminantes más comunes son: aceites, combustibles, polvo, arena y sal. Se pueden encontrar metales pesados originados por la corrosión de los materiales cromados o galvanizados, y por las emisiones atmosféricas de vehículos, mobiliario urbano e industrias. Los metales pesados predominantes son el zinc y el plomo; sin embargo, se puede encontrar níquel, cobre, mercurio, cromo y cadmio (Cole *et al.*, 1984). El deterioro de los pavimentos contribuye sólo con una pequeña fracción de la masa contaminante en las vías (Asplund *et al.*, 1982).

La lista de constituyentes presentada en el Tabla 1 contiene los principales contaminantes que están directamente relacionados con fuentes antropogénicas y con el tráfico.

Los diferentes tipos de fuentes de contaminación presentan gran variedad en su tamaño. El uso de llantas supone el desprendimiento de partículas con un diámetro medio de 20 μm (Kobringer y Geinopolos, 1984). El 25% del plomo emitido por los escapes de los vehículos está asociado con partículas de diámetro mayor de 9 μm (Habibi, 1973). Es

Tabla 1. Contaminantes presentes en la escorrentía de las superficies de rodadura (adaptada de Ball *et al.*, 1998 y Duncan, 1999)

Constituyente	Fuente
Plomo	Escapes de vehículos, uso de llantas, aceite lubricante, grasa, articulaciones soldadas, pinturas.
Zinc	Uso de llantas, aceite de motor, grasa, pastillas de frenos.
Cobre	Galvanizado de metales, uso de llantas, rodamientos y articulaciones en vehículos, movimiento de partes del motor, revestimiento de frenos, fungicidas e insecticidas.
Cadmio	Uso de llantas, escapes de vehículos, aplicación de insecticidas.
Hierro	Corrosión de vehículos, estructuras de acero, movimiento de partes del motor.
Cromo	Galvanizado de metales, movimiento de partes del motor, revestimiento de frenos.
Níquel	Combustible diesel y petróleo de escapes, aceite lubricante, galvanizado de metales, rodamientos, revestimiento de frenos, pavimento asfáltico.
Manganeso	Movimiento de partes del motor, uso de llantas, pastillas de frenos.
Cobalto	Radiadores, cadenas para llantas, articulaciones.
Partículas	Uso del pavimento, vehículos, atmósfera, mantenimiento de vías.

de gran importancia clarificar la cantidad de contaminación asociada con los diferentes rangos de tamaño de las partículas, para tener una buena efectividad en el diseño de los mecanismos de control de la contaminación.

Debido a la cantidad de contaminantes asociados al tráfico vehicular se han encaminado investigaciones para tratar de relacionar su influencia con la cantidad de contaminación encontrada sobre la superficie de las calles. Algunos estudios presentan como hipótesis la relación directa entre la densidad de tráfico y la cantidad de contaminación presente; sin embargo, existen otros como el realizado por Barrett *et al.* (1993) donde se sugiere que la influencia del tráfico no es muy significativa de un lugar a otro, atribuyendo las variaciones a muchos otros factores.

La hipótesis más utilizada (Sartor y Boyd, 1972) hasta el momento en los estudios de acumulación y lavado de la contaminación indica que el tiempo transcurrido desde el lavado por una lluvia o por una barredora mecánica está directamente relacionado con la cantidad de contaminación presente. Pitt y Army (1973), Ellis y Revitt (1982), Sansalone y Tribouillard (1999), y German y Svensson (2002) profundizaron en la evaluación del contenido de los metales pesados en los sedimentos acumulados sobre la superficie de una vía. La mayoría de las investigaciones muestran que los contaminantes están generalmente más concentrados en las fracciones de menor tamaño. Dempsey *et al.* (1993) concluye que el diseño de las mejores prácticas de control de la contaminación (MPC) debe ir encaminado a eliminar dichas fracciones.

El barrido de las vías ha sido considerado como un proceso de limpieza para remover contaminantes, pero su validez es muy cuestionable. El barrido de las vías remueve solamente el 15% de la fracción inferior a $45 \mu\text{m}$ y el 48% de la fracción menor de $246 \mu\text{m}$ (Sartor y Boyd, 1972), y en general partículas entre $75 \mu\text{m}$ y $3.000 \mu\text{m}$ (Valiron, 1992). Los contaminantes analizados en este estudio tienen preferencia por la fracción más fina del sedimento, lo cual hace que el barrido no sea considerado como un mecanismo de limpieza durante el período de análisis.

El objetivo principal del presente estudio es analizar el comportamiento y determinar el contenido de los metales pesados en los sedimentos acumulados sobre la superficie de una vía urbana. Se pretende determinar la concentración y la carga de los diferentes metales pesados asociados con la suciedad acumulada sobre las vías urbanas.

Materiales y métodos

Descripción del lugar

El lugar de investigación se ubicó en el Bulevar Ronda Rufino Peón perteneciente a la ciudad de Torrelavega, en la Comunidad Autónoma de Cantabria, al norte de España. Su clima atlántico (templado) se caracteriza por las lluvias abundantes a lo largo de todo el año (precipitación media anual: 1.230 mm), la elevada humedad y la suavidad de las temperaturas.

La zona de estudio se encuentra localizada dentro de una cuenca de uso residencial, rodeada por áreas abiertas y poco edificadas. El bulevar cuenta en cada uno de sus dos sentidos con un carril para el tráfico, otro para aparcamiento y otro más para el tránsito de las bicicletas. El carril para las bicicletas está separado de la calzada por un bordillo de concreto y una línea de vegetación. El sistema de desagüe de la calzada está constituido por una cuneta lateral en concreto, sobre la cual se encuentra localizada una serie de imbornales cada 40 m. El bulevar da acceso a áreas residenciales, pero es usado frecuentemente por vehículos de tipo comercial. El área de estudio se dividió en dos zonas, cuyas características principales se muestran en el Tabla 2.

Tabla 2. Principales características de cada zona.

Característica	Zona (1)	Zona (2)
Densidad residencial	Baja	media
Líneas de tráfico	2 ^a	2 ^a
Líneas de aparcamiento	2 ^{a,b}	2 ^a
Longitud (m)	300	310
Pendiente longitudinal (%)	0.2	4
Pendiente Transversal (%)	4	4
Capa de rodadura/textura	Asfalto/rugoso	Asfalto/rugoso
Densidad media de tráfico (Vehículos/día)	3800	3800
Densidad máxima de tráfico (Vehículos/h)	600	600
Velocidad promedio (km/h)	55-60	55-60
Composición (%)	coches: 92; camionetas: 5; camiones sin remolque: 2.5; camiones con remolque: 0.25; autobuses: 0.25	

Notas: ^a: una en cada sentido; ^b: subutilizadas por la baja densidad residencial.

Sistema de muestreo

Las muestras se tomaron en días de tiempo seco, a un costado de la cuneta, a la misma hora y durante un período de 65 días (del 28 de septiembre al 1 de diciembre de 2004). La superficie de muestreo tuvo un área de 0.49 m^2 ($0.70 \text{ m} \times 0.70 \text{ m}$). Las dimensiones del área de muestreo se garantizaron colocando sobre la superficie un marco de acrílico de idénticas dimensiones que las del área de muestreo. En la recolección del sedimento se utilizó un aspirador (Moulinex Boogy parquet, CEG2) de 1.5 kW de potencia (Figura 1). Se controló el lugar de muestreo para evitar repetir y poder estar cerca de anteriores puntos de recolección.

Dos tipos de muestras fueron recolectadas sobre la superficie de cada zona. La primera muestra corresponde a la aspirada directamente sobre la superficie de muestreo, la cual se llamó "carga libre" (CL). Seguidamente, la misma superficie fue barrida con un cepillo de fibras para que los sedimentos adheridos a la misma estuvieran disponibles para ser aspirados; al sedimento recolectado después del barrido se le llamó "carga fija" (CF). La superficie de muestreo fue barrida ligeramente para evitar el desprendimiento de partículas pertenecientes al pavimento, intentando aplicar el mismo esfuerzo sobre el cepillo durante todo el período de muestreo. La "carga total" (CT) depositada sobre la superficie está constituida por la suma de la "carga libre" y la "carga fija."



Figura 1. Equipo y localización del sitio de muestreo

Los datos meteorológicos de precipitación y temperatura fueron tomados de una estación pluviométrica administrada por la Universidad de Cantabria, localizada a pocos metros del área de estudio (ver Figura 2).

Análisis de laboratorio

La distribución por tamaños de las partículas se determinó usando los métodos de tamizado en seco y en húmedo (ISO 2591). Solamente las partículas menores de $125 \mu\text{m}$ fueron tamizadas en húmedo (un 50% de las muestras). El rango de la serie de tamices utilizada para el análisis granulométrico,

estuvo comprendido entre $2.800 \mu\text{m}$ y $63 \mu\text{m}$. Se utilizó el tamizado en seco porque las muestras así lo requerían para su posterior análisis químico. El método de tamizado en húmedo fue empleado porque no tiende a subestimar la fracción más fina del sedimento recolectado.

El contenido de metales pesados se determinó utilizando un equipo (Perkin Elmer, AAnalyst 300) de espectrometría de absorción atómica con llama (ISO/CD-11047). Las muestras fueron previamente digeridas con una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico; $\text{HCl}:\text{HNO}_3$, 3:1 (ISO 11466). Se analizaron los siguientes metales pesados: Pb, Zn, Cu y Cd.

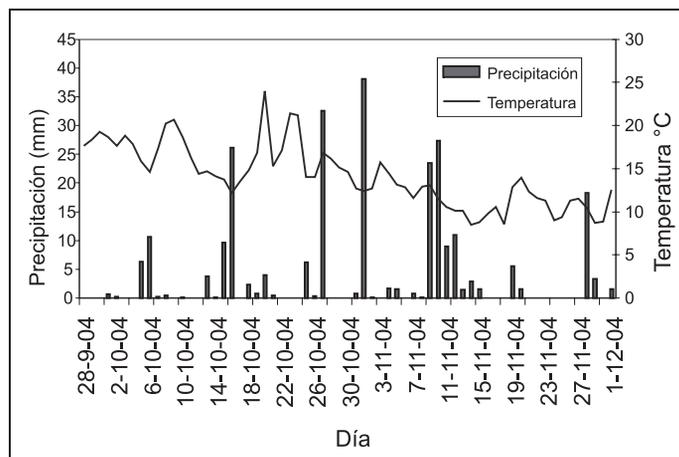


Figura 2. Datos climatológicos para el período de muestreo (28/09/04-01/12/04)

Resultados y discusión

Acumulación y lavado de la carga superficial de sedimento

La Figura 3 presenta la precipitación y la variación de las diferentes cargas analizadas (libre, fija y total) para la calzada de la zona 1 durante el período de muestreo. Un comportamiento similar registraron las cargas de la zona 2.

Carga superficial de sedimento

Se presentaron once intervalos de tiempo seco durante el período de muestreo (Figura 3), seis de los cuales fueron superiores a un día: del 24 de septiembre al 1 de octubre (siete días), del 3 al 5 de octubre (tres días), del 9 al 13 de octubre (cinco días), del 22 al 24 de octubre (tres días), del 17 al 18 de noviembre (dos días), y del 22 al 27 de noviembre (seis días). En todos ellos se observó un claro aumento de la carga total superficial a medida que pasaban los días de tiempo seco. La carga total media depositada por día de tiempo seco sobre la calzada fue de 1.2 g/m^2 en la zona 1, y de 2.7 g/m^2 en la zona 2.

Granulometría del sedimento

La cantidad total de muestras recolectadas sobre la superficie de la calzada fue de 112; 56 por cada zona (28 muestras de carga libre y 28 de carga fija). Se utilizaron siete tamices

con un rango de tamaño entre $2.800 \mu\text{m}$ y $63 \mu\text{m}$ para determinar la distribución granulométrica del sedimento recolectado. La Figura 4 muestra la distribución media por tamaños para las cargas fija, libre y total del sedimento recolectado sobre la superficie de la calzada en cada zona.

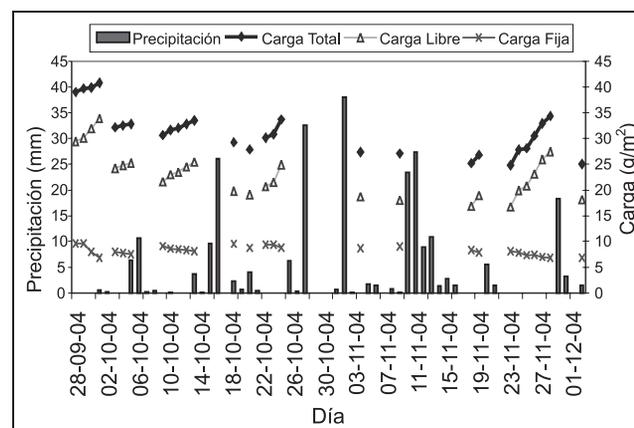


Figura 3. Cargas sobre la calzada de la zona 1

Se observó la existencia de pequeñas variaciones en la distribución granulométrica de las muestras, pero en general, sus características eran similares. La envolvente de la distribución de los tamaños para la carga fija era más estrecha que la de la libre, indicando una menor variabilidad en el tamaño de las partículas. Los análisis granulométricos mostraron que el 82% de la carga libre era menor de $1.000 \mu\text{m}$, y el 6,5% menor de $63 \mu\text{m}$. Como era de esperar, la carga fija fue mucho más fina: el 98% era menor de $1.000 \mu\text{m}$, y cerca de un 27% menor de $63 \mu\text{m}$. Al analizar la carga total se apreció que el 86% de las partículas eran menores de $1.000 \mu\text{m}$, y un 11,5% menores de $63 \mu\text{m}$ (Figura 4). Se reporta en estudios similares, como por ejemplo el realizado por Sartor y Boyd (1972), que el 5,9% de las partículas eran menores de $43 \mu\text{m}$ y el 56,5% mayores de $246 \mu\text{m}$ con respecto a la muestra total; Vaze y Chiew (2002) encontraron que el porcentaje de las partículas menores de $100 \mu\text{m}$ era de 10% y 15% para la carga libre y la carga fija, respectivamente.

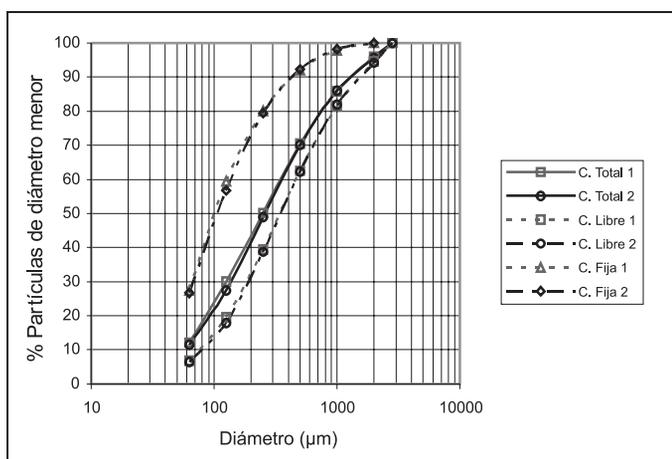


Figura 4. Granulometría de las diferentes cargas en cada zona

La variación entre autores en la distribución granulométrica de los sedimentos recolectados sobre la superficie de la calzada se debe principalmente a las características particulares de cada lugar de muestreo y a la eficiencia de los diferentes métodos empleados en la recolección del sedimento (aspirado en seco, barrido en seco, aspirado y barrido en seco, y lavado y aspirado simultáneo). Sin embargo, sus resultados son coherentes con los del presente estudio.

Las partículas menores de 125 μm fueron tamizadas en húmedo para tratar de cuantificar de mejor manera la fracción más fina del sedimento recolectado. Los resultados mostraron, que las partículas menores de 63 μm están subestimadas por el método de tamizado en seco en un 10,1% para la carga libre, y en un 14,6% para la fija. Dicha diferencia sugiere que parte de la fracción más fina del sedimento se encuentra aglomerada o adherida a partículas de tamaño mayor. Igualmente, Viklander (1998) encontró diferencias entre los dos sistemas de tamizado (en seco y en húmedo), haciéndose más evidente en las partículas menores de 75 μm .

Metales pesados

Concentraciones

El análisis de la concentración (mg/kg) de los metales pesados fue realizado a las fracciones comprendidas entre 0-63 μm , 63-125 μm , 125-250 μm , 250-500 μm , 500-1.000 μm , 1.000-2.000 μm y 2.000- 2.800 μm . No se analizaron las fracciones mayores a 2.800 μm porque tienden a tener concentraciones muy bajas (Sansalone y Buchberger, 1997). Se realizaron en total 72 estimaciones (18 de carga fija y 18 de carga libre, en cada zona) para determinar la concentración de los metales pesados asociados con las diferentes fracciones de tamaño. Los resultados sugieren que la concentración de los metales pesados es mayor en la fracción más fina y disminuye a medida que aumenta el diámetro de las partículas (Tabla 3). Este resultado es similar en las investigaciones realizadas por Pitt y Army (1973), Ellis y Revitt (1982), Sansalone y Tribouillard (1999), y German y Svensson (2002).

Tabla 3. Concentración de los metales pesados con un intervalo de confianza del 95%

Concentración para la carga total (mg/kg de materia seca)								
Fracción de tamaño (μm)								
Zona		< 63	63-125	125-250	250-500	500-1000	1000-2000	2000-2800
Pb	1	328 \pm 50	254 \pm 47	246 \pm 57	261 \pm 59	199 \pm 61	149 \pm 33	127 \pm 47
	2	371 \pm 55	305 \pm 48	299 \pm 50	333 \pm 54	221 \pm 39	158 \pm 37	107 \pm 25
Zn	1	604 \pm 35	392 \pm 25	309 \pm 33	255 \pm 33	126 \pm 21	80 \pm 11	29 \pm 10
	2	655 \pm 50	406 \pm 25	309 \pm 27	281 \pm 44	152 \pm 36	86 \pm 14	39 \pm 12
Cu	1	110 \pm 14	86 \pm 12	90 \pm 15	122 \pm 36	46 \pm 9	35 \pm 6	23 \pm 8
	2	137 \pm 18	96 \pm 11	117 \pm 16	160 \pm 37	47 \pm 10	36 \pm 8	24 \pm 7
Cd	1	42 \pm 10	24 \pm 6	20 \pm 6	22 \pm 6	12 \pm 3	8 \pm 2	3 \pm 1
	2	33 \pm 12	22 \pm 6	17 \pm 5	21 \pm 8	10 \pm 2	8 \pm 1	5 \pm 2

La fracción menor de 63 μm presentó las mayores concentraciones en todos los metales estudiados, excepto

para el cobre, donde la máxima concentración se obtuvo en la fracción comprendida entre 250 μm - 500 μm . Ellis y Revitt (1982) detectaron un comportamiento similar en la concentración del cobre. El zinc es el único metal en el que la concentración disminuye continuamente a medida que aumenta el tamaño de la partícula. Para los demás metales la concentración tiende a aumentar en la fracción comprendida entre 250 μm - 500 μm , volviendo a disminuir de forma continua para los diámetros mayores de 500 μm . Probablemente el aumento en dicha fracción (250 μm - 500 μm) de la concentración de los metales pesados esté ocasionado por partículas muy finas que están adheridas a la superficie y que son difícilmente cuantificables por medio del método de tamizado en seco.

Al comparar los resultados entre las dos zonas de estudio se observó que la zona con mayor influencia de vehículos en la línea de aparcamiento tendió a presentar concentraciones mayores. Una posible explicación a dicha tendencia es que al estar rodeada por edificaciones se encuentra menos expuesta a la influencia directa del viento, facilitando así la acumulación de polvos y partículas sobre la misma.

Las concentraciones de plomo y zinc en las partículas menores de 1.000 μm fueron 20 y 1,6 veces mayores que las reportadas por Viklander *et al.* (1998) en un estudio realizado sobre una vía urbana con un tráfico promedio de 4.500 vehículos por día, en Luleá, al norte de Suecia. Por el contrario, la concentración de cobre para la misma fracción fue 1,8 veces menor, probablemente por un estilo diferente en la conducción, por ejemplo, un mayor uso de los frenos. Germán y Svensson (2002) realizaron otro estudio sobre una vía urbana con un tráfico promedio de 11.200 vehículos por día, en el que utilizaron como sistema de recolección del sedimento un aspirador de un kW de potencia. Los metales pesados estudiados por ellos (Cu, Pb y Zn) presentan mayores concentraciones, excepto para el plomo, donde la concentración es ocho veces mayor en el presente estudio. Los resultados sugieren un mayor uso de gasolina con plomo por parte de los vehículos que transitan las zonas en estudio. Además se puede observar la influencia que tiene la densidad de tráfico en la concentración de los metales pesados estudiados. Ver en el Tabla 2, líneas de aparcamiento, y en el Tabla 3, concentraciones en las zonas 1 y 2.

Se realizaron análisis de regresión para todas las concentraciones en función del diámetro de las partículas (Tabla 5). Diferentes modelos de regresión fueron probados y la función exponencial es la que mejores resultados produjo para la mayoría de los metales ($R^2 \geq 0.87$). La concentración tiende a ser inversamente proporcional al diámetro de la partícula,

lo cual es verdadero si se asume que está relacionada con la superficie específica y que las partículas del sedimento

recolectado son esféricas. En la práctica, asumir que las partículas son esféricas y que la concentración es inversamente proporcional al diámetro, es una buena aproximación de la realidad (Sansalone y Tribouillard, 1999).

Tabla 4. Ecuaciones de regresión para la concentración de los metales pesados

Metal	Modelo								
	Conc. = $-a \times d^2 + b$			Conc. = $a \times d^{-b}$			Conc. = $a \times e^{-b \times d}$		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Pb	74.5	311.5	0.90	186.9	0.26	0.83	320.7	0.37	0.96
Zn	162.9	422.8	0.70	113.5	0.68	0.91	459.9	0.93	0.96
Cu	36.7	115.8	0.71	49.6	0.41	0.71	121.1	0.61	0.87
Cd	8.9	26.3	0.69	9.9	0.49	0.89	27.4	0.67	0.92

d': Diámetro de la partícula en mm

Carga superficial

Se estudiaron las cargas (mg/m²) de los metales pesados asociadas con cada fracción de tamaño. La Tabla 6 presenta el porcentaje de la carga total asociado a cada fracción de tamaño en las zonas analizadas. Los resultados muestran, en general, que la fracción menor de 63 µm es la que tiene la mayor carga asociada de metales pesados, excepto para el Cu, donde la fracción de tamaño con mayor carga es la comprendida entre 250 µm y 500 µm. Cerca del 50% de los metales pesados se encuentran asociados a fracciones de tamaño mayores de 125 µm (arenas finas). Ellis y Revitt (1982), Stone y Marsalek (1996), y Sansalone y Tribouillard (1999), obtuvieron resultados similares.

Tabla 5. Porcentaje asociado a la carga total con un intervalo de confianza del 95%

	Carga total superficial asociada de metales pesados (%)						
	Fracción de tamaño (µm)						
	< 63	63-125	125-250	250-500	500-1000	1000-2000	2000-2800
Pb	23 ± 3	15 ± 2	21 ± 2	23 ± 4	11 ± 2	5 ± 1	2 ± 1
Zn	33 ± 3	18 ± 1	21 ± 2	17 ± 2	7 ± 2	3 ± 1	1 ± 1
Cu	21 ± 4	13 ± 2	24 ± 4	32 ± 7	7 ± 2	3 ± 1	1 ± 1
Cd	35 ± 5	18 ± 2	17 ± 3	14 ± 3	10 ± 3	4 ± 2	1 ± 1

Tabla 6. Concentración media con un intervalo de confianza del 95%

Metal	Concentración (mg/kg de materia seca)	Salud humana. (Gobierno Vasco, 2005) España		U.S.EPA (2002)	
		Diámetro < 280 µm	Límite Inferior ^a	Límite máximo ^b	Límite Inferior
Pb	228 ± 47	120	450	50	220
Zn	272 ± 29	---	1000	200	410
Cu	93 ± 15	---	1000	65	270
Cd	14 ± 4	5	25	1.5	10

^a: Límite inferior de aceptabilidad del riesgo, por encima de este nivel el riesgo puede ser inaceptable. ^b: Máximo riesgo tolerable

Finalmente, el contenido de los metales pesados en el sedimento recolectado fue comparado con las directivas de calidad ambiental de la U.S.EPA, disposición en el océano del material dragado, 2002, y con las establecidas en la Ley 1/2005 de 4 de febrero para la prevención y corrección de la contaminación del suelo del Gobierno vasco, España (Tabla 7).

En general las concentraciones de los metales pesados estudiados superan el límite inferior de aceptabilidad. Además el plomo y el cadmio requieren especial atención, ya que las concentraciones encontradas en los sedimentos se acercan o superan los límites máximos establecidos.

Conclusiones

Los datos obtenidos muestran que la carga superficial aumenta en función del número de días de tiempo seco. También se aprecia que la concentración de los metales pesados en las muestras del sedimento es inversamente proporcional al diámetro de la partícula y que los elementos metálicos tienen preferencia por la fracción más fina del sedimento. Los resultados indican que cerca del 50% de la carga total de los metales pesados se encuentra asociada a fracciones de tamaño mayores de 125 µm (arenas finas). Estos resultados pueden ser utilizados en el desarrollo de estrategias para la remoción de los metales transportados por la escorrentía superficial en las vías urbanas. Finalmente, al comparar con las directivas de calidad ambiental de la U.S.EPA y las establecidas por el Gobierno vasco, España, se observa que las concentraciones de los metales pesados en el sedimento generalmente superan los límites inferiores establecidos, y que las concentraciones de plomo y cadmio requieren especial atención.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) y la Universidad de Cantabria, España.

Nomenclatura

CL: Carga libre; CF: Carga fija; CT: Carga total.

Bibliografía

- ASCE., Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems., Manuals and Reports of Engineering Practice, Alexandria, Manual Practice FD – 20, ISBN: 0-87262-855-8, 1992.
- Asplund, R., Mar, B. and Ferguson, J., Total Suspended Solids in Highway Runoff in Washington State., Journal of the Environmental Engineering Division, Vol. 108, 1982, pp. 391-393.
- Ball, J. E., Jenksb, R. and Aubourgb, D., An Assessment of the Availability of Pollutant Constituents on Road Surfaces., The Science of the Total Environment, Vol. 209, 1988, pp. 243-254.
- Barret, M. E., Zuber, R. D., Collins, E. R., Malina, J. F., Charbeneau, R. J. and Ward, G. H., A review and Evaluation of the Literature Pertaining to the Quality and Control of Pollution from Highway Runoff and Construction., The Science of the Total Environment, Vol. 209, 1993, pp. 243-254.
- Cole, R. H., Frederick, R. E., Healy, R. P. and Rolan, R. G., Preliminary Findings of the Priority Pollutant Monitoring Project of the Nationwide Urban Runoff Program., Journal WPCF, Vol. 56, 1984, pp. 898-908.

Dempsey, B. A., Tai, Y. L. and Harrison, S. G., Mobilization and Removal of Contaminants Associated with Urban Dust and Dirt., *Water Science and Technology*, Vol. 28, 1993, pp. 225-230.

Duncan, H. P., *Urban Storm Water Quality: A Statistical Overview*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Australia, Report 03, 1999.

Ellis, B. J., and Revitt, M. D., Incidence of heavy Metals in street surface sediments: Solubility and grain size studies., *Water, Air and Soil Pollution*, Dordrecht, The Netherlands, Vol. 17, 1982, pp. 87-100.

Furumai H., Balmer H. and Boller M., Dynamic Behavior of Suspended Pollutants and Particle Size Distribution in Highway Runoff., *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, 2002, pp. 413-418.

German, J. and Svensson, G., Metal Content and Particle Size Distribution of Street Sediments and Street Sweeping Waste., *Water Science and Technology*, Vol. 46, 2002, pp. 191-198.

Gobierno Vasco., Ley 1/2005 de 4 de Febrero para la Prevención y Corrección de la Contaminación del Suelo., BOPV, España, No. 32 ZK, 2005, pp. 2085-2135.

Habibi, K., Characteristics of Particulate Matter in Vehicle Exhaust, *Environmental Science and Technology*, Vol. 7, 1973, pp. 223-234.

Kobriger, N. K. and Geinopolos, A., Sources and Migration of Runoff Pollutants., U.S. Dept. of Transport. Washington D.C., USA, Research Report, Vol. 3, 1984.

Novotny, V., Urban Diffuse Pollution: Sources and Abatement., *Water Environmental and Technology*, U.S., January, 1991, pp. 40-43.

Pitt, R. E., Army, G., Toxic Materials Analysis of Street Surface Contaminants, EPA. Washington DC, USA, Report No. R2-73-283, 1993.

Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., Characterization of Solid and Metal Element Distributions in Urban Highway Stormwater., *Water Science and Technology*, Vol. 3, 1997, pp. 155-160.

Sansalone, J. J. and Tribouillard, T., Variation in Characteristics of Abrade Roadway Particles as a Function of Particle Size: Implications for Water Quality and Drainage., *Transportation Research Record*, No. 1690, 1999, pp. 153-163.

Sartor, J. D. and Boyd, G. B., *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants.*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, Report No. EPA-R2-72/081, 1972.

Stahre P and Urbonas B., *Storm Water Detection. For Drainage, Water Quality and CSO management.*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, ISBN: 0-13-849837-7, 1990.

Stone, M. and Marsalek, J., Trace Metal Composition and Speciation in Street Sediment: Sault Ste, *Water, Air and Soil Pollution.*, Vol. 87, 1996, pp. 149-169.

U.S.EPA., *Environmental Impacts of Stormwater Discharges.. A National Profile*, Office of Water, Washington, DC, USA, Report No. EPA 841-R-92-001, 1992.

U.S.EPA., *National Ocean Disposal Guidelines for Dredged Material*, Washington, DC, USA, ISBN: 0-642-54831-5, 2002.

Valiron, F. et Tabuchi, J. P., *Maitrise de la Pollution Urbaine par Temps de Pluie. État de L'art, Tec. & Doc-Lavoisier*, Paris, ISBN: 2-85206-863-X, 1992.

Vaze, J. and Chiew, H. S., Experimental Study Pollutant Accumulation on an Urban Road Surface., *Urban Water*, Vol. 4, 2002, pp. 379-389.

Viklander, M., Particle Size Distribution and Metal Content in Street Sediments., *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, 1998, pp. 761-766.