

NIVELES DE PLOMO, ZINC, CADMIO Y COBRE EN EL RIO ALMENDARES, CIUDAD HABANA, CUBA

Lázaro LIMA CAZORLA¹, Susana OLIVARES-RIEUMONT¹,
Isaida COLUMBIE¹ Daniel de la ROSA MEDEROS¹ y Reinaldo GIL CASTILLO²

¹Laboratorio de Análisis Ambiental. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Ave. Salvador Allende y Luaces, Plaza, Ciudad Habana, Cuba. Correos electrónicos: susana@info.isctn.edu.cu, lima@ctn.isctn.edu.cu.

²Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Ave. Monumental y carretera 8 vías, Pedro Pi, Ciudad Habana, Cuba.

(Recibido febrero 2005, aceptado mayo 2005)

Palabras clave: plomo, cobre, cadmio y zinc, contaminación ambiental, Río Almendares, sedimentos, *Eichhornia crassipes*

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar los niveles de Pb, Cu, Zn y Cd existentes en el Río Almendares (Ciudad de la Habana, Cuba), para ello se establecieron 15 estaciones de muestreo a lo largo del río y se realizaron los análisis de estos metales en los sedimentos y en la planta *Eichhornia crassipes*, durante la temporada de seca de 2003 y 2004. En los sedimentos del río se encontraron contenidos de Pb entre 38.7 y 217.5 mg/kg, de Cd de <1.0 a 4.8 mg/kg, de Cu entre 32.9 y 420.8 mg/kg y de Zn entre 69.9 y 708.8 mg/kg. Se analizaron también estos metales en la raíz de la macrófita *Eichhornia crassipes*, donde se detectaron niveles entre 7.0 y 143.0 mg/kg para Pb, <1.0 y 3.9 mg/kg para Cd, de 45 a 466 mg/kg para Zn y entre 5.1 y 77.0 mg/kg para Cu, encontrándose que la distribución espacial de estos metales en la raíz de la planta fue similar a la hallada para los sedimentos en el río. De hecho, se obtuvieron correlaciones significativas ($P < 0.05$) entre los contenidos de Zn y Cu en los sedimentos y en la raíz de la planta.

Key words: lead, copper, zinc, cadmium, pollution, Almendares River, sediments, *Eichhornia crassipes*

ABSTRACT

The objective of this study was to assess the levels of Pb, Cu, Zn and Cd in Almendares River (Havana City, Cuba). Fifteen sampling stations were located along the river. The concentrations of these metals were determined in the sediments and the roots of *Eichhornia crassipes* during the dry season of 2003 and 2004. Concentrations of Pb between 38.7 and 217.5 mg/kg, of Cd between <1.0 and 4.8 mg/kg, of Cu between 32.9 and 420.8 mg/kg, and of Zn between 69.9 and 708.8 mg/kg were found in river sediments. In the roots of the *Eichhornia crassipes*, a widespread macrophyte in the Almendares River, the concentrations of metals varied from 7.0 - 143.0 mg/g for Pb, <1.0 - 3.9 mg/g for Cd, 45 - 466 mg/g for Zn and 5.1 - 77.0 mg/g. Similar spatial distribution was established for the metals in the sediments and in the plant's roots. Significant correlations ($P < 0.05$) were found for Cu, and Zn contents in *Eichhornia crassipes* roots and in the sediments.

INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de agua urbanos son a menudo muy afectados por la contaminación, ya que, debido al rápido crecimiento de las ciudades sin la adecuada cobertura higiénico-sanitaria o a la industrialización sin medidas de protección del entorno, se les ha provocado un deterioro intenso de la calidad y la cantidad de sus aguas.

La Ciudad de la Habana no está ajena a los problemas de muchas ciudades modernas y sus fuentes superficiales de agua también están afectadas por la contaminación. La cuenca hidrográfica Almendares-Vento, en donde se sitúa la capital cubana, es una de las fuentes de agua más importantes de Cuba y tiene para los territorios habaneros una gran importancia: alrededor de 47 % del agua potable que consume la población de la ciudad proviene de la cuenca subterránea Vento, pero además las aguas del Río Almendares y sus tributarios, son utilizadas en la agricultura, la pesca, la industria y con fines recreativos.

De los 402.02 km² que tiene el área de la cuenca, el 52.8 % pertenece a la provincia Ciudad de la Habana y el 47.14 % a la provincia de la Habana. El área ocupada por la Ciudad de la Habana, se caracteriza por un alto grado de urbanización, ya que en este territorio viven más de medio millón de personas, quienes de una forma u otra utiliza las aguas de la cuenca (CCAV 1999).

Actualmente el cauce principal del Río Almendares, presenta una situación higiénico-sanitaria crítica como consecuencia de las descargas que recibe de aguas residuales industriales y urbanas sin tratamiento o ineficientemente tratadas, zonas críticas de erosión del suelo, inadecuado manejo de la cuenca y deforestación. Alrededor de 70 fuentes contaminantes de diferentes tipos vierten sus aguas residuales al río, por lo que se presupone la existencia de altos niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos, entre ellos sustancias tóxicas como metales pesados. (CCAV 1999).

Entre los metales pesados más peligrosos para la vida acuática se encuentran el Pb, Cu, Zn y Cd, ya que son muy tóxicos aún en concentraciones relativamente bajas, no son biodegradables y por el contrario se acumulan a lo largo de la cadena trófica (Fergusson 1992). Estos metales, sin embargo, son ampliamente utilizados en diferentes procesos tecnológicos y llegan al río como resultado de las aguas residuales deficientemente tratadas y del escurrimiento de la ciudad. Actualmente se desconoce la situación de la contaminación del Río Almendares con estos metales y, por ello, las estrategias de saneamiento que se han diseñado no incluyen a estos importantes contaminantes.

El objetivo de esta investigación fue determinar los niveles actuales de Pb, Cu, Zn y Cd existentes en el Río Almendares, para ello se utilizó el análisis de los metales en los sedimentos y en la planta acuática *Eichhornia crassipes*.

Desafortunadamente, aún no están vigentes en Cuba normas que regulen la calidad de los sedimentos de las aguas superficiales, en lo referido a los niveles límites permitidos de metales pesados. Por ello, para evaluar la contaminación se utilizaron criterios internacionales de calidad de los sedimentos, como algunos empleados por los de la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (US EPA 1997) y la norma del Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (Persaud *et al.* 1993).

El análisis de metales en los sedimentos tiene la ventaja de que permite hacer una estimación integrada en tiempo y espacio de la contaminación (Förstner y Wittmann 1981). Los sedimentos son los destinatarios de la mayor parte de los metales que llegan al río, pero además, una fuente importante de estos metales, ya que puede producirse la disolución parcial de los mismos y su paso a las aguas y a los organismos vivos, como resultado de cambios físicos y químicos en las condiciones del río. (Tessier *et al.* 1979).

Algunos autores consideran que es posible establecer una relación entre los contenidos de metales en los sedimentos y en los organismos vivos que habitan el medio en cuestión, por ejemplo en las plantas acuáticas (St-Cyr *et al.* 1994). Sin embargo, teniendo en cuenta que existen diferentes mecanismos y vías a través de las cuales, los organismos vivos presentes en los cuerpos de agua pueden asimilar los metales, otros autores opinan que para estimar adecuadamente la fracción del metal biodisponible en el medio acuático, es necesario hacer la determinación del metal en los organismos (Ehler y Luthy 2003).

Utilizando este criterio se seleccionó la planta *Eichhornia crassipes* (EC). Se conoce que es una macrófita concentradora de metales pesados y se le ha propuesto como monitora y biorremediadora de la contaminación en los ríos tropicales (Chigbo 1982, Maddock *et al.* 1988). En el Río Almendares, la EC se encuentra ampliamente distribuida. De hecho, debido a la gran cantidad de nutrientes que la misma encuentra, se convierte en una plaga que cubre gran parte del lecho del río (CCAV 1999).

Aunque el objetivo de este trabajo fue determinar los niveles de metales en el río, el propósito a más largo plazo de esta investigación es sugerir criterios a las autoridades ambientales cubanas para la inclusión de estos metales en las estrategias de saneamiento del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de las estaciones de muestreo

A pesar de que están identificadas las fuentes contaminantes del Río Almendares, no se conocen los niveles de metales pesados que dichas fuentes vierten al río. Por ello, para ubicar las estaciones de muestreo de modo que el resultado del monitoreo reflejara realmente los niveles de metales del río, fue necesario hacer una evaluación de los procesos que tienen lugar en dichas instalaciones y de esta forma, precisar aquellas que pudieran ser fuentes puntuales de contaminación con metales.

A las fuentes contaminantes registradas, se les dió una clasificación según su proceso tecnológico, con puntuación mayor a aquellas que según la bibliografía pueden ser fuentes de contaminación con estos metales (Martin y Coughtrey 1981, Fergusson 1992, Kabata-Pendias y Pendias 1992, CCAV 1999), de esta forma se obtuvo un esquema de la posible contaminación con metales en el río y sus tributarios (Fig.1).

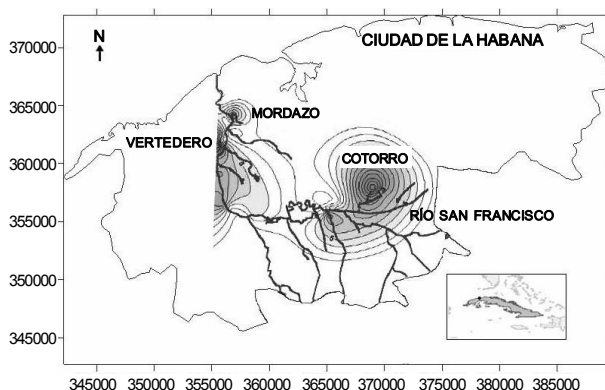


Fig.1. Probabilidad de contaminación con metales pesados en el Río Almendares

En la **figura 1**, las zonas más oscuras corresponden a las fuentes reportadas como mayores contaminantes con metales, es decir, fundiciones, vertederos de residuos sólidos urbanos e industriales, fábricas de pintura y electroplatinado, residuos municipales, tenerías, etc.

Teniendo en cuenta la distribución de las fuentes contaminantes y la morfología del río, se establecieron 15 estaciones (**Fig.2**), que se ubicaron aguas abajo de donde, según los resultados que se muestran en la **figura 1**, se encontraban las fuentes puntuales más importantes. En aquellos lugares donde existían numerosas fuentes de contaminación, las estaciones se

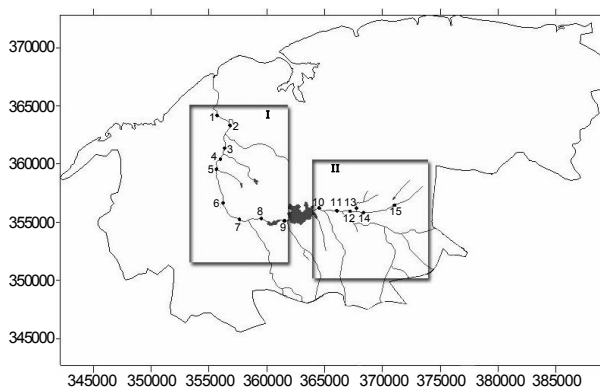


Fig.2. Estaciones de muestreo en la cuenca del Río Almendares

situaron equidistantes. Las estaciones comprendieron un área aproximada de 100 m².

Se establecieron dos zonas de muestreo separadas por la presa Ejército Rebelde; debido a que la mayor parte del flujo superficial de la cuenca es interrumpido por la presa, ambas zonas pueden considerarse de forma independiente, ya que a partir de la presa, el río se recarga fundamentalmente de aguas subterráneas.

Parte alta de la cuenca (Zona II)

Comprendida entre el límite este de Ciudad de la Habana y la presa Ejército Rebelde. Esta zona presenta afectaciones de la calidad de sus aguas debido a que las mismas reciben descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarias. Contribuyen a la contaminación, las aguas y lodos residuales procedentes del poblado Cotorro, de fincas porcinas y ganaderas en las márgenes del río y sobre todo industrias, como el centro metalúrgico ubicado en el Cotorro, que incluye varias fundiciones secundarias que vierten sus aguas residuales al río San Francisco, afluente del Almendares. Esta pudiera ser una fuente importante de contaminación con metales pesados en esta zona, no sólo por el vertimiento directo de sus residuales, sino por la emisión de gases que contienen estos metales y que llegarían al río como resultado del escurrimiento. En la parte alta de la cuenca se establecieron 6 estaciones de muestreo.

Parte baja de la cuenca (Zona I)

La parte baja comprendió el tramo entre la presa Ejército Rebelde, hasta el Puente del Bosque, muy próximo a donde comienza la zona estuarina del río. Varios pequeños afluentes llegan al río en esta zona, donde el mismo recibe la descarga de aguas de origen doméstico de diferentes poblados, así como de

los efluentes pobremente tratados del colector de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) “María del Carmen” y de numerosas industrias que se encuentran en la zona, entre ellas fábricas de pinturas, transformaciones metálicas, galvanoplastia, fundiciones, etc. Esta zona también es afectada por el escurrimiento del vertedero de Calle 100 (estación 4), un depósito de residuos sólidos urbanos e industriales de nivel provincial. Aguas abajo de esta estación, el Almendares continúa recibiendo aportes, puntuales y difusos de aguas residuales de origen doméstico e industrial y la contribución de contaminantes que llegan al río a través de los tributarios. En esta zona se establecieron 9 estaciones de muestreo.

Muestreo de sedimentos y de plantas

El monitoreo se realizó durante el período de seca (febrero-abril) de 2003 y 2004. En esta época, el Río Almendares es poco profundo y estrecho (ancho promedio 4 a 5 m). Las muestras de sedimento se tomaron con un muestreador tipo “core” de polipropileno de 5 cm de diámetro interno y 1 m de longitud, a aproximadamente 1 m de ambas orillas, donde la corriente fuera lo más calmada posible. Durante el muestreo se tuvo cuidado de no alterar la interfase agua-sedimento. En cada estación se tomaron 6 muestras para disminuir la variabilidad espacial dentro de una misma estación y se elaboró una muestra compuesta uniendo la capa superficial (de aproximadamente 5 cm) del sedimento de cada una de las muestras tomadas. Entre un muestreo y otro el equipo se lavó cuidadosamente con agua del río. En el laboratorio, las muestras se secaron y se tamizaron. Para el análisis de los metales se utilizó la fracción de partículas $<63\ \mu\text{m}$, esta es la fracción donde, según algunos autores, está contenida la mayor cantidad de metales pesados en los sedimentos (Förstner, y Wittmann 1981, Sakai *et al.* 1986).

Las macrófitas se colectaron manualmente y para garantizar que las muestras fueran representativas de cada estación y no aquellas que migraron a través de la corriente, las mismas se tomaron a un metro de la orilla, siempre tratando de que fuera en un área donde existiera una distancia entre la franja de colección y la corriente del río. En cada estación se colectaron de 10 a 12 plantas de aproximadamente el mismo tamaño, en diferentes lugares de la estación. Las plantas se recogieron en bandejas plásticas. En el laboratorio las plantas se lavaron con abundante agua y se fraccionaron en raíz y tallo. Se elaboró una muestra compuesta uniendo todas las

raíces de las plantas de una misma estación, después se secaron en la estufa a $105\ ^\circ\text{C}$ por 48h. Las muestras se fraccionaron en pequeñas porciones y se maceraron con un mortero de ágata, añadiéndole nitrógeno líquido para facilitar la trituration.

Determinación de metales en sedimentos y plantas

Tanto la digestión del sedimento, como de las raíces de las plantas se realizó por vía húmeda. Debido a que análisis previos de los sedimentos demostraron la existencia de altos contenidos de materia orgánica, se realizó la digestión siguiendo recomendaciones de Bighman y Bartels (1996).

La digestión del sedimento se realizó en la forma siguiente: 500 mg de sedimento se digirieron con 5 mL de ácido fluorhídrico en vasos de precipitado de teflón y se dejó refluja hasta la disolución de las sales, después se le añadieron 5 mL de ácido perclórico y se calentó hasta la desaparición de los humos blancos; posteriormente se continuó la digestión con 10 mL de ácido nítrico y se llevó hasta la disolución de las sales, por último se enrasó a un volumen final de 25 mL.

Para el análisis de la planta *Eichhornia crassipes* se pesaron 500 mg de la muestra seca y pulverizada de cada estación y se sometieron al siguiente proceso: se añadieron 5 mL de HF concentrado y posterior calentamiento hasta sequedad, 5 mL de HNO_3 concentrado y se refluja por 20 minutos, después se le añadieron 5 mL de HClO_4 , 5 mL de HNO_3 y 5 mL de HCl, llevándose a sales húmedas después de cada adición del reactivo. Las muestras se enrasaron a un volumen final de 25 mL.

Los metales se midieron con la técnica de absorción atómica con llama en un equipo Buck Scientific 210VGP con llama aire/acetileno y corrector de fondo con lámpara de deuterio. Toda la cristalería empleada se mantuvo durante 24 horas en HNO_3 1.5 mol/L, posteriormente se lavó varias veces con agua bidestilada.

Para la evaluación de la calidad analítica, la digestión de las muestras se realizó por triplicado y en los materiales de referencia certificados (nueve réplicas de cada uno) SOIL-7, del Organismo Internacional de Energía Atómica y BCR No. 60 (metales traza en la planta acuática *Lagarosiphon major*). Los parámetros analíticos del método utilizado se muestran en el **Cuadro I**. Se logró exactitud (en términos de recobró) en la determinación de los metales en las muestras certificadas. La precisión (en términos de desviación estándar relativa) varió entre 3.5 y 8.9 %.

CUADRO I. PARÁMETROS DE CALIDAD ANALÍTICA DE LA DETERMINACIÓN DE LOS METALES

Parámetro	Cd	Cu	Zn	Pb
Límite de detección (mg/kg)	0.4	1.0	0.5	7.5
Límite de cuantificación (mg/kg)	1.0	5.0	1.0	12.0
Intervalo lineal (mg/kg)	1.0 – 50.0	5.0 – 175	1.5 - 45	12.5 - 850
Recobrado (%) (SOIL-7)	115	95	99	116
Recobrado (%) (BCR No. 60)	96	98	110	102

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Niveles de metales en los sedimentos

En el **cuadro II** se muestran las concentraciones en que se encuentran Cu, Zn, Pb y Cd en los sedimentos de las 15 estaciones seleccionadas. Se observa una alta variabilidad de los niveles de metales a lo largo de todo el cuerpo de agua, aunque no fue posible hacer comparaciones con los niveles basales locales, ya que no hay datos acerca de los niveles de estos metales en la zona.

En el **cuadro II** se observa igualmente, que los niveles encontrados en el Río Almendares son comparables con los niveles reportados para otros ríos urbanos europeos (Rubio *et al.* 1991, Bubb y Lester 1994, Garban *et al.* 1996, Fuchs *et al.* 1997). Sin embargo, los contenidos son inferiores a los niveles reportados en cuerpos de agua asociados a la minería como algunos ríos europeos cuyos contenidos de metales varían entre 2.9 y 4.2 mg/kg para Cd, 526 y 738 mg/kg para Cu, 950 y 2996 mg/kg para Pb y 652 y 1014 mg/kg para Zn (Campos *et al.* 1990, Usero *et al.* 1997) o de los EUA donde se encontraron niveles de Cd entre 3.4 y 403 mg/kg, de Cu entre 11.8 y 446 mg/kg, de Pb entre 158 y 12406 mg/kg y Zn entre 293 y 9619 mg/kg (Gale *et al.* 2004).

Es decir, se puede considerar a la contaminación en el Río Almendares como resultado de la actividad urbana, con la incidencia de numerosas fuentes contaminantes. Sin embargo, lo que más llama la atención en los resultados obtenidos fue la elevada variabilidad espacial de los niveles de metales en las 15

estaciones muestreadas, encontrándose que los valores máximos son entre 5 y 10 veces superiores a los valores mínimos, lo que indica la existencia de fuentes puntuales importantes de contaminación.

Al graficar la distribución espacial de los contenidos de metales en el río (**Fig. 3**) se observa que en la zona alta del mismo los mayores valores de Cu, Zn y Pb ($p < 0.05$) se encontraron en la estación 13. Esta estación se encuentra sobre el Río San Francisco, tributario del Almendares, aguas abajo de donde se produce el vertimiento de las aguas residuales provenientes del poblado del Cotorro. Una de las fuentes más importantes de metales pesados en este poblado son varias fundiciones que descargan sus residuales líquidos en esta zona.

Es bien conocido que las fundiciones secundarias, como las que se encuentran en el Cotorro son fuentes de metales pesados, pero también lo son las aguas y lodos de origen doméstico y municipal (Kabata-Pendias 1992). En este poblado en la actualidad no se tratan las aguas de origen doméstico, si no que todas (incluidas las industriales) se colectan en una “zanja o colector” central y se descargan al Río San Francisco.

Al parecer el impacto de las descargas del Cotorro, afecta también a las estaciones localizadas aguas abajo, y como se muestra en la **figura 4**, para Zn y Cu se observa una disminución de la contaminación de los sedimentos corriente abajo con el aumento de la distancia de la fuente, y aproximadamente a dos kilómetros de la estación 13, la concentración de estos metales disminuye de 60 a 70 %. Similares resul-

CUADRO II. NIVELES DE METALES EN LOS SEDIMENTOS

	Cd		Concentración (mg/kg)				Zn	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Río Almendares 2003	<1.0	4.4	71.6	420.8	39.3	189.0	86.1	708.8
Río Almendares 2004	<1.0	4.8	32.9	350.2	38.7	217.5	69.9	527.2
Ríos Urbanos Europeos	0.36	8.7	23	310	46	295	45	709

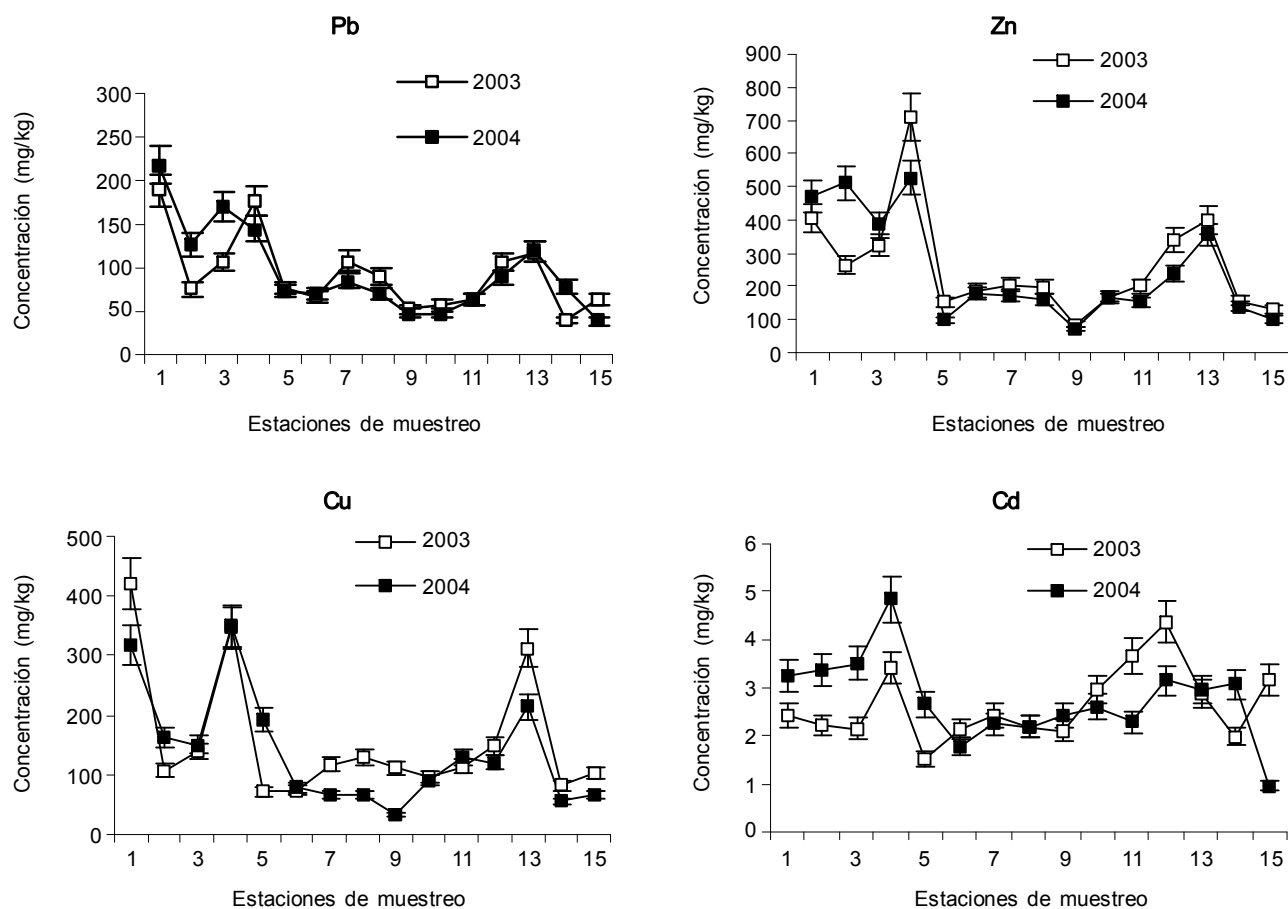


Fig.3 Distribución de los metales en los sedimentos del río

tados se ha reportado también para otros ríos, por ejemplo, en Sudbury, Ontario, Canadá donde se encuentran localizadas numerosas fundiciones, los contenidos de metales en sedimentos varían rápidamente con la distancia de la fuente (St-Cyr *et al.* 1997).

Para el Cd, se encontraron los mayores contenidos

($p < 0.05$) en la estación 12 en el año 2003 y en la estación 4 en el año 2004, lo que sugiere la posible existencia de fuentes de contaminación con este metal en estas áreas.

La última estación de la zona alta se encuentra justamente a la entrada de la presa Ejército Rebelde

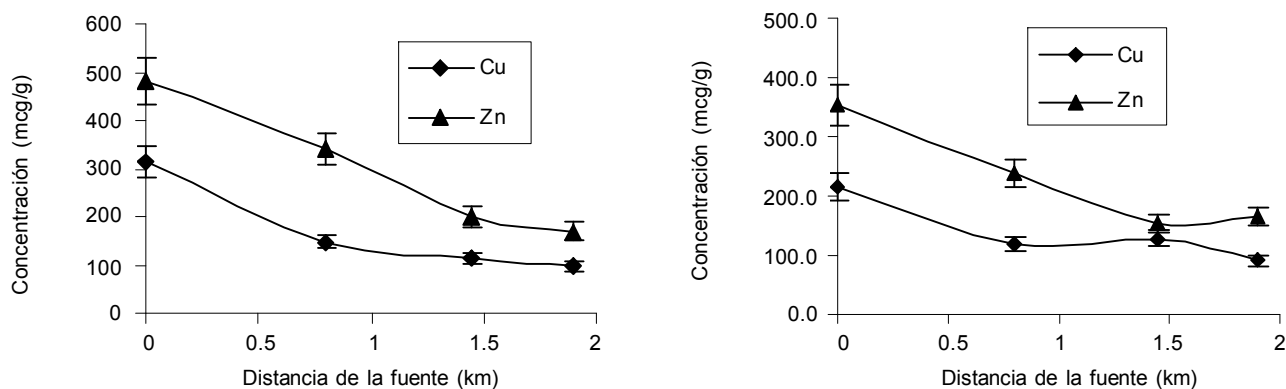


Fig.4. Concentración de Zn y Cu en sedimentos en la parte alta del río en 2003(la estación 13 está marcada como la distancia cero)

que fue construida en una zona cárcica para servir de recarga de las aguas subterráneas de la cuenca Almendares-Vento; divide al río en dos secciones, que en temporada de seca no se comunican superficialmente, de forma tal, que después de la presa el Río Almendares se recarga sólo de fuentes subterráneas.

Por esta razón, es de esperar que la primera estación de la zona baja (9), localizada muy próxima a la presa no debe encontrarse contaminada. De hecho, se observa (**Fig. 3**), que las concentraciones de metales son relativamente bajas en la estación 9 y van incrementando su valor hacia la estación 5, posiblemente debido a las distintas fábricas que se encuentran próximas al río y que descargan sus residuales en el mismo, entre ellas las fábricas de pintura, materiales de construcción, transformaciones metálicas, electrónicas, etc. Así mismo, en esta área descargan residuales domésticos como los del poblado de Calabazar y de la planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra fuera de servicio.

En la parte baja del río, para Cu, Zn, Pb y Cd, se encontraron los tenores máximos en la estación 4, que está localizada aguas abajo de uno de los canales de lixiviación de un importante vertedero provincial para residuos sólidos urbanos e industriales. Es conocido que los vertederos son fuentes de metales pesados que se lixivian a partir de la interacción de los metales con los compuestos orgánicos presentes en los residuos sólidos. Estos compuestos se movilizan a través de los procesos de escurrimiento y pasan al río, donde se adsorben en los minerales de los sedimentos. Por ello, en la cercanía de los vertederos de residuos sólidos urbanos pueden encontrarse altos niveles de metales en los sedimentos, en concentraciones como las reportadas por Gonçalves *et al.* (2004) de 6 a 1016 mg/kg de Cu, 61 a 852 mg/kg de Zn y 38 a 125 mg/kg de Pb. Esta fuente de contaminación también afecta las estaciones localizadas aguas abajo. Observándose, una disminución de la concentración de los metales al alejarse de la fuente (estaciones 3 y 2), lo que indica que el vertedero esta causando una contaminación severa en esta zona.

Para el Cu, Pb y Zn se observa nuevamente un incremento de la concentración en la estación 1. No fue posible atribuir este incremento a ninguna fuente puntual reportada en esta zona. Sin embargo, los altos niveles encontrados pudieran estar relacionados con la incorporación, aguas arriba de esta estación, de las aguas provenientes del afluente Mordazo, con una importante carga contaminante (CCAV 1999). La estación 2, cercana a este afluente, por razones de accesibilidad, se ubicó aguas arriba de la confluen-

cia del Mordazo con el Almendares. Sin embargo, esta hipótesis requiere de una comprobación ulterior.

Al comparar los niveles de Cu, Zn, Pb y Cd encontrados en los sedimentos de las diferentes estaciones muestreadas, con los sugeridos en guías internacionales como son, la norma del Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (Persaud *et al.* 1993) y la guía de calidad utilizada por US EPA (1997), pueden hacerse las siguientes consideraciones.

La norma del Ministerio de Medio Ambiente de Ontario, reporta dos valores límites; el nivel de bajo efecto (NBE), concentración a partir de la cual los efectos adversos en los organismos bentónicos comienzan a observarse y el nivel de efecto severo (NES) cuando la contaminación a este nivel indica impactos críticos en las comunidades bentónicas. Se observa en la zona estudiada, que para todas las estaciones y para los cuatro elementos, los niveles son superiores a los indicados como NBE, mientras que los NES se superan sólo para Cu en la mayoría de las estaciones.

De acuerdo con los niveles que señala la guía de calidad utilizada por US EPA, divididos como nivel de efecto bajo (ERL) y nivel de efecto medio (ERM), se superan los valores de ERL en prácticamente todas las estaciones para todos los metales. Para Cu, se superan los valores de ERM en las estaciones 1, 4, 13 en ambos años y para Zn, en las estaciones 1, 2 y 4, en 2004 y 1 y 4 en 2003.

Es decir, aunque la situación de la contaminación de los sedimentos según estas normas no es crítica a lo largo del río y los niveles son sólo mayores que aquellos donde se comienzan a observar efectos adversos, existen algunas estaciones que pueden considerarse críticas por los altos niveles de metales y por lo tanto, se requiere tomar medidas urgentes. Estas son las estaciones relacionadas con el vertedero de Calle 100 (4), el río Mordazo (1) y aquella donde descargan los residuales del Cotorro (13). Es de esperar que si se toman medidas para disminuir la contaminación en estas estaciones la situación del río con respecto a la contaminación con metales, mejore notablemente.

La comparación entre los niveles de metales en 2003 y 2004 utilizando el análisis de varianza de clasificación doble (Miller y Miller 2002) demuestra que no existen diferencias significativas para un nivel de significación del 5 % entre las concentraciones halladas en ambos años. Este hecho es lógico, debido a que los sedimentos son integradores temporales de la contaminación y por otra parte, en estos dos años no se han realizado intervenciones sustanciales en el río que pudieran disminuir los niveles de metales en el mismo.

Contenidos de metales en la raíz de la *Eichhornia crassipes* (EC)

Varios autores han planteado que en las raíces de EC es donde se encuentran los mayores niveles de metales (Maddock *et al.* 1988, Vesik y Allaway 1997) y sugieren realizar los análisis fundamentalmente en este órgano. De hecho, en el análisis realizado a las hojas de las plantas en 2004, sólo se encontraron cantidades medibles de Pb, Cu y Zn. El plomo en las hojas se encontró en concentraciones que variaron entre 20 y 63 % de los niveles hallados en la raíz, mientras que el Zn se localizó entre 0 y 19 % y el Cu entre 0 y 25 %. Este resultado corresponde al encontrado por otros autores, que plantean que mientras Pb y Zn pueden traslocarse en las plantas vasculares, otros metales como Cr, Ni e incluso Cu parecen ser bastante inmóviles (St-Cyr *et al.* 1997). Esta traslocación está relacionada con el tiempo y

los niveles de exposición. En EC se ha encontrado (Xiaomei *et al.* 2004) que el Cd se moviliza hacia los órganos superiores; sin embargo en el Río Almendares las concentraciones de Cd son pequeñas y es posible que al traslocarse este metal se distribuya en bajas concentraciones en la biomasa y no sea posible detectarlo con la técnica empleada.

Por las razones antes mencionadas se tomaron las raíces para el análisis de los metales en EC. En la **figura 5** se muestran los contenidos de metales en las raíces de las plantas en los dos años monitoreados. Se encontró que tanto los metales en las raíces como en los sedimentos (**Fig. 3**) tienen un comportamiento espacial similar. Por ejemplo, se advierte que las mayores concentraciones de Pb, Cu y Zn en las raíces de las plantas, en la zona baja del río, se encuentran en la estación 4, cercana al vertedero de residuos sólidos urbanos y en la estación 1. En la zona

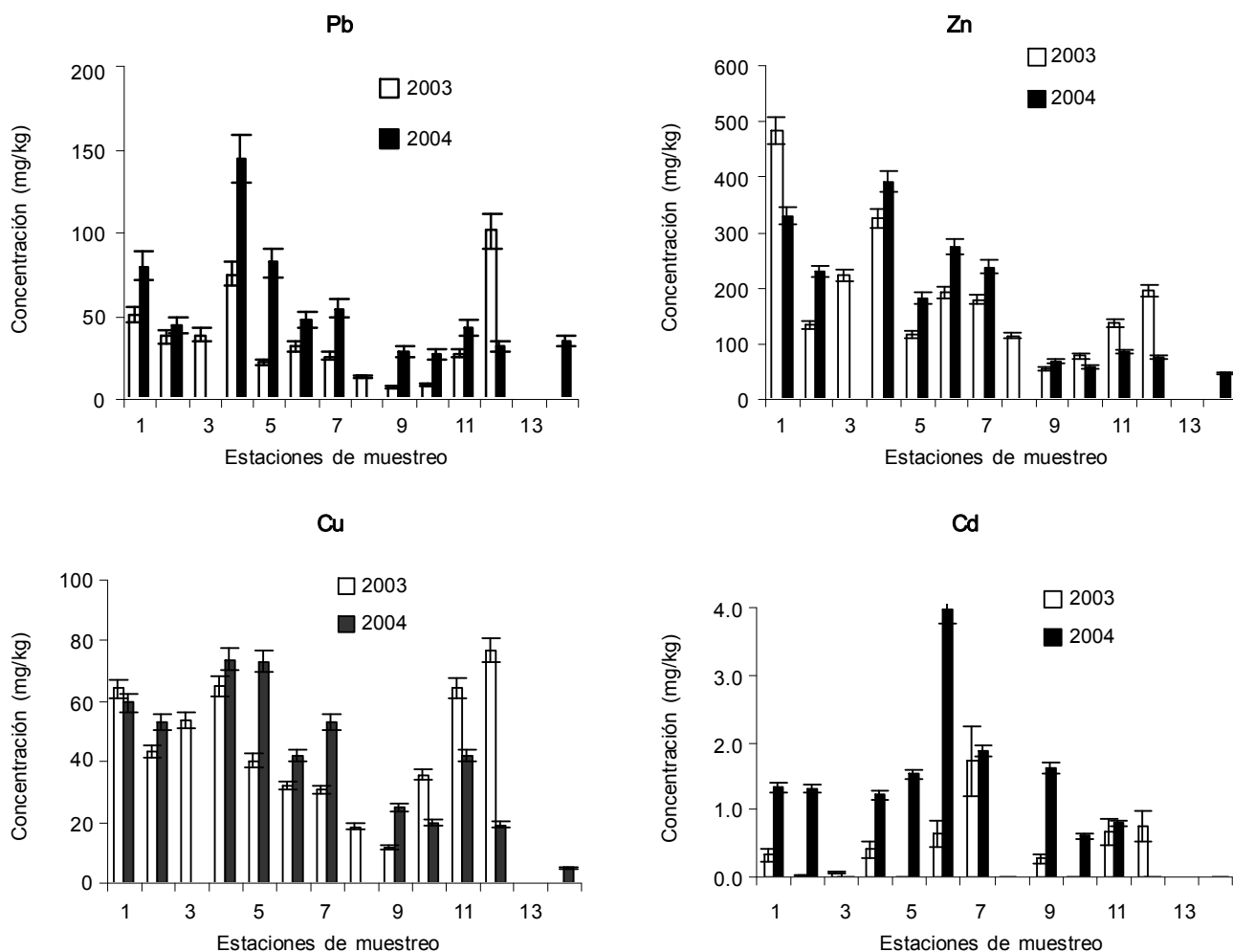


Fig.5 Contenidos de metales en las raíces de la *Eichhornia crassipes*

baja del río se observa un incremento de las concentraciones de metales en las estaciones aguas abajo de la estación 13. En esta última no se encontraron plantas debido a la alta contaminación que presentaba la misma.

Haciendo un análisis de varianza de clasificación doble se encontró que aunque el comportamiento espacial de los contenidos de metales en las plantas fue similar en ambos años, por lo general, se hallaron niveles mayores de metales ($p < 0.05$) en la zona alta en 2004. En la zona baja del río, en la estación 6, en 2004 se encontraron en las raíces concentraciones de Cd más altas ($p < 0.05$) que en 2003. Estos resultados parecen indicar la presencia de una fuente contaminante puntual con este metal en la zona cercana a esta estación. Aunque en los sedimentos no es muy apreciable esta contaminación, al parecer las plantas, son más sensibles a la misma, lo que puede deberse a que ellas también toman los metales directamente de las aguas (St-Cyr *et al.* 1997).

Como EC es una planta flotadora, puede esperarse que la principal fuente de incorporación de metales en la misma, sea a través de su absorción a partir de la columna de agua. Cuando el volumen hídrico del río es alto, la planta flota gracias a los pecíolos que se llenan de aire en su interior. Sin embargo, cuando el volumen es bajo el pecíolo se alarga adoptando otra conformación y la planta se enraíza, tomando los nutrientes a partir de los sedimentos (Niño-Sulkowska y Lot 1983). Por ello, en época de secas esta planta flotadora permanece casi estacionaria y las concentraciones de los metales en ella son representativas de la zona de estudio, muy relacionadas con las concentraciones de los metales en los sedimentos.

Al establecer una correlación entre la concentración de los metales en las raíces de EC y en los sedimentos, según se muestra en el **cuadro III**, se encontraron coeficientes significativos para Cu y Zn, en un nivel de confianza de $p < 0.01$ y tamaño de muestra $N=20$. Esto significa que las concentraciones de

estos elementos en la raíz de EC son indicadoras de las concentraciones de metales en los sedimentos. Sin embargo, para el Cd y el Pb las correlaciones no fueron significativas, lo que pudiera deberse a otras vías de incorporación de estos metales a la planta, por ejemplo, la adsorción directamente de las aguas.

Este resultado es muy importante porque en los sedimentos se determinan los contenidos totales de los metales; sin embargo al hacer el análisis en las plantas se miden directamente aquellos metales que están disponibles a la biota (Ehler y Luthy 2003), y el hecho de que se encuentren altos contenidos de metales en las raíces de las plantas en el río, demuestra que gran parte de ellos son biodisponibles.

La distribución espacial de los metales hallada en el río como resultado de los análisis efectuados (**Fig. 3**), confirmó el modelo de probabilidad de la contaminación elaborado sobre la base de la peligrosidad de las industrias que se encuentran en la cuenca (**Fig. 1**) y es a su vez un resultado importante, ya que permite establecer pautas para eliminar la contaminación del río con metales pesados, jerarquizando aquellas fuentes que son las causantes de una mayor contaminación.

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis de Zn, Cu, Pb y Cd efectuados a los sedimentos del Río Almendares muestran que los niveles de estos elementos son superiores a aquellos donde comienzan a manifestarse los efectos adversos hacia la biota, y en algunas estaciones incluso, superiores a los que indican severos impactos en la biota. Por otra parte, los altos contenidos de metales encontrados en las raíces de la planta *Eichhornia crassipes* indican que gran parte de estos metales están biodisponibles y que representan un peligro potencial para la vida en el río.

REFERENCIAS

- Bighman J. y Bartels J. (1996) *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical methods*. (D.L. Sparks, Ed.). Soil Science Society of America. Book Series 5, Madison, WI. 1390 p.
- Bubb J. M. y Lester J. N. (1994). Anthropogenic heavy metals inputs to Lowland River systems, a case study. The River Stour, U. K. Water, Air Soil Pollut. 78, 279-296.
- Campos J. M., Usero J. y Gracia I. (1990). Contaminación por metales en sedimentos del río Tinto. Tecnología del agua. 2do Monográfico, pp. 49-56.

CUADRO III. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE LOS METALES EN LAS RAÍCES DE *Eichhornia crassipes* Y EN LOS SEDIMENTOS

Elementos	Concentración en sedimentos	N
Cu	0.65*	20
Pb	0.29	20
Zn	0.71*	20
Cd	0.081	20

*Correlaciones significativas a $p < 0.01$

- CCAV (1999). *Reporte Técnico sobre la Cuenca Almendares-Vento*, Consejo de Cuenca Almendares-Vento, CITMA, C. Habana, 54 p.
- Chigbo F. (1982). Uptake of arsenic, cadmium and mercury from polluted water by the water hyacinth *E. crassipes*. *Environ. Pollut.* 27, 31-36.
- Ehler L.J. y Luthy R.G. (2003). Contaminant bioavailability in soil and sediment. *Env. Sci. and Tech.* 3, 296
- Fergusson J.E (1992). *The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects*, Pergamon Press, Nueva York, 502 p.
- Förstner U. y Wittmann G.T.W (1981). *Heavy metal pollution in the aquatic environment (2a ed.)*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Fuchs S., Haritopoulou T., Schafer M. y Wilhelmi M. (1997). Heavy metals in freshwater ecosystems introduced by urban rainwater runoff-monitoring of suspended solids river sediments and biofilms. *Water Sci. Technol.* 36, 277-282.
- Gale N., Adams C., Wixxon B., Loftin K. y Huang Y. (2004). Lead, zinc, copper and cadmium in fish and sediments from the Big River and Flat River Creek of Missouri's Old Lead Belt. *Environ. Geochem. Health* 26, 37-49.
- Garban B., Ollivon D., Carru A. M. y Chesterikoff A. (1996). Origin, retention and release of trace metals from sediments of the River Seine. *Water, Air Soil Pollut.* 87, 363-381.
- Goncalves M., Nogueiras J., Figueiras J., Putnis C. y Almeida C. (2004). Base-metal and organic content in stream sediments in the vicinity of a landfill. *Appl. Geochem.* 19, 137-151.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. (1992). *Trace elements in soil and plants*, CRC Press, Boca de Raton, Ann Arbor, Londres, 365p.
- Maddock J., Santos M. y Marinho R. (1988). *Eichhornia Crassipes* as biological monitor of heavy metals in surface waters. En: *Metal in coastal environment of Latin America*, Pring Verlag, Berlín, 297 p
- Martin M. y Coughtrey P. (1981). *Biological monitoring of heavy metal pollution*. Applied Science Publishers, Londres, 373p.
- Miller N.J. y Miller J.C. (2002). *Statistic and Chemometrics for Analytical Chemistry* (4a ed.). Prentice Hall, Nueva York, 278 p.
- Niño-Sulkowska M. y Lot A. (1983). Estudio demográfico del lirio acuático *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: dinámica de crecimiento en dos localidades selectas de México. *Bol. de la Soc. Bot. de Méx.* 45, 71-83.
- Persaud D., Jaagumagi R. y Hayton A. (1993). *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario*. Ontario Ministry of the Environment, Ottawa, Ontario. 23 p.
- Rubio R., López-Sánchez J. F. y Rauret G. (1991). La especiación sólida de trazas de metales en sedimentos. Aplicación a sedimentos muy contaminados. *Anal. Quím.* 87, 599-605.
- Sakai H., Kojima Y. y Saito K. (1986). Distribution of heavy metals in water and sieved sediments in the Toyohira River. *Water Res.* 20, 559-567.
- St-Cyr L., Cattaneo A., Chasse R. y Fraikin C. (1997). Technical evaluation of monitoring methods using macrophytes, phytoplankton and periphyton to assess the impact of mine effluents on the aquatic environment. Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canadá, 218 p.
- Tessier A., Campbell P.G.C. y Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51, 844-851.
- USEPA (US Environmental Protection Agency) (1997). The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States. EPA 823-R-97-006.
- Usero J., Morillo J. y Gracia I. (1997). Contaminación por metales en sedimentos acuáticos. *Tecnología del agua* 166, 44-50.
- Vesk P. A. y Allaway W. G. (1997). Spatial variation of copper and lead concentrations of water hyacinth plants in a wetland receiving urban run-off. *Aquat. Bot.* 59, 33-44.
- Xiaomei L., Maleeya K., Prayad P. y Kanuporn H. (2004). Removal of cadmium and zinc by water hyacinth *Eichhornia Crassipes*. *Sci. Asia* 30, 93-103.