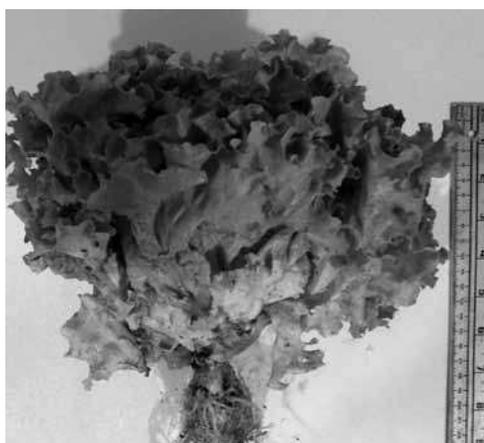


Evaluación de tratamientos para disminuir cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) regada con agua del río Bogotá

Evaluation of treatments to reduce cadmium concentration in lettuce (*Lactuca sativa* L.) irrigated with water from the Bogota River



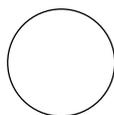
JULIANA RUIZ ^{1, 2}

Lechuga variedad Vera.

Foto: J. Ruiz

RESUMEN

Las aguas del río Bogotá presentan altos niveles de contaminación, incluyendo metales pesados, y sus aguas son utilizadas para el riego de importantes extensiones agrícolas. El presente estudio se realizó en el Centro Agropecuario Marengo (Mosquera, Cundinamarca) y su objetivo fue evaluar tratamientos sencillos para disminuir la acumulación de cadmio en lechuga. Los tratamientos fueron: (1) crecimiento selectivo de arvenses en las parcelas; (2) aplicación de CaCO_3 antes de trasplante; (3) incorporación de compost antes de trasplante, y (4) control. Se aplicó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se realizaron mediciones de cadmio en agua, suelo y lechuga. Se tomaron medidas de crecimiento de la lechuga, y se midió el pH y la conductividad eléctrica del suelo. Se encontraron altas concentraciones iniciales de cadmio en suelo ($3,97 \text{ mg kg}^{-1}$). Estas concentraciones bajaron significativamente a los 46 días después del trasplante en el tratamiento con arvenses ($3,38 \text{ mg kg}^{-1}$). El tratamiento con compost disminuyó significativamente la concentración de cadmio en lechuga ($0,26 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto a los otros tratamientos ($0,45\text{--}0,60 \text{ mg kg}^{-1}$) y en corto tiempo aumentó significativamente el peso fresco de las lechugas respecto a los demás tratamientos sin fertilizar; no se encontró relación de esta disminución con el aumento del pH.



Palabras clave adicionales: compost, arvenses, CaCO_3 , metales pesados, contaminación.

¹ Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia).

² Autor para correspondencia. ruiz.juliana.m@gmail.com

ABSTRACT

The water of the Bogota River has high levels of contamination including heavy metals and its waters are used to irrigate crops in important areas. The present study was conducted in the Marengo Agricultural Center (Mosquera, Cundinamarca) and its objective was to evaluate easy treatments to reduce cadmium accumulation in lettuce. The treatments used were: (1) Selective weed growth in the plots, (2) CaCO_3 application before plant transplanting, (3) Compost application before plant transplanting and (4) the Control. This study was performed with a randomized complete block design with three repetitions. Amounts of cadmium in the water, soil and lettuce were measured. Measurements of plant growth, pH and electrical conductivity of the soil were also taken. The results showed high initial concentrations of cadmium in the soil (3.97 mg kg^{-1}). These concentrations were found to be significantly lower 46 days after transplanting in the weed treatment (3.38 mg kg^{-1}). The compost treatment significantly lowered the concentration of cadmium in lettuce compared to the other treatments and quickly, significantly increased fresh weight compared to the other treatments without fertilizer; no relationship between the decrease of cadmium and increased pH was found.

Additional key words: compost, weed, CaCO_3 , heavy metals, contamination.

Fecha de recepción: 04-10-2011

Aprobado para publicación: 21-11-2011

INTRODUCCIÓN

El río Bogotá en su cuenca alta y media recibe aguas residuales domésticas, vertimientos industriales y contaminación proveniente de actividades agropecuarias (CAR, 2009). La contaminación proveniente de la industria incluye materia orgánica, sales minerales, nitrógeno, sulfuros, contaminación bacterial y metales pesados.

Según la CAR (2009), el río Bogotá recibe un total de $51,62 \text{ t mes}^{-1}$ de metales pesados provenientes de vertimientos industriales. En el Acuerdo 43 de 2006, la CAR reporta concentraciones de cadmio de $0,003 \text{ mg L}^{-1}$ en el sector superior de la cuenca alta y en la cuenca media, y concentraciones de $0,008\text{--}0,009 \text{ mg L}^{-1}$ en la cuenca baja; niveles inferiores a los permitidos por la norma colombiana ($<0,01 \text{ mg L}^{-1}$), pero superiores a los máximos permitidos por la norma francesa ($<0,001 \text{ mg L}^{-1}$) (Miranda *et al.*, 2008a).

A pesar de la deteriorada calidad del agua, en la cuenca media del río Bogotá los productores realizan actividades agrícolas y utilizan sus aguas

para la producción, dentro de las que se cuentan 650 ha de cultivos hortícolas (Miranda *et al.*, 2008a), lo que genera riesgo a los consumidores.

Miranda *et al.* (2008a, b) encontraron concentraciones de cadmio en lechuga y apio a los 74 d después del trasplante (ddt; $>0,2 \text{ mg kg}^{-1}$), que superan ampliamente los niveles establecidos por la Unión Europea (2006).

El cadmio es un metal pesado cuya presencia en los suelos puede tener origen natural o antrópico y se acumula principalmente en la superficie; no es esencial para completar el ciclo de vida de los organismos; es uno de los más tóxicos en la cadena alimenticia y no experimenta degradación química o microbial (Chen *et al.*, 2010; Curtis y Smith, 2002; Miranda *et al.*, 2008b).

La exposición de las personas al cadmio se da principalmente a partir de los alimentos y se ha encontrado que las especies difieren en su capacidad para absorberlo y acumularlo. La lechuga,

la espinaca, el apio y el repollo, forman parte de las que acumulan mayores cantidades (Ghosh y Singh, 2005).

El cadmio se encuentra relacionado con enfermedades y alteraciones en diferentes órganos, como disfunciones hepáticas, enfisema, anemia, osteomalacia, deterioro neurológico y daño en testículos, páncreas y glándulas suprarrenales (Winter, 1982; Nomiyama y Nomiyama, 1998). A pesar de la posible incidencia de estas enfermedades por la ingestión periódica de cadmio a través de las hortalizas en Bogotá y sus alrededores, no existe vigilancia ni monitoreo de problemas de salud ocasionados por metales pesados por parte de ningún ente de vigilancia y control en salud pública.

Lara y Bonilla (2010) resumen algunas estrategias para disminuir los metales pesados tóxicos en suelos agrícolas así: i) incorporación de materia orgánica para formar quelatos estables; ii) incremento de pH hasta 6-7 para disminuir su solubilidad y consiguiente disponibilidad para plantas; iii) aumento de fosfatos para formación de sales insolubles; iv) aporte de materiales silicados para la formación de complejos y aumento del pH y v) remediación microbial.

Igualmente, otros estudios demuestran que el uso de compost animal disminuye significativamente la absorción de cadmio entre 34% y 62%, según la especie y el compost utilizado, atribuyéndolo al aumento del pH del suelo, al complejamiento del cadmio con la materia orgánica y la coprecipitación con el fósforo (Chen *et al.*, 2010; Sato *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2009).

Otra técnica para remover contaminantes de suelo y agua es la fitorremediación que consiste en el uso de plantas vasculares, algas u hongos para la descontaminación de agua, suelo o aire (Zhao *et al.*, 2003). Para su desarrollo se han estudiado especies hiperacumuladoras, por su capacidad de extraer y acumular altas concentraciones de dichos elementos. El factor de bioconcentración

(BCF, por sus siglas en inglés) se utiliza frecuentemente para medir la capacidad de extracción del contaminante por parte de las plantas. Liang *et al.* (2009) la define como la relación entre la concentración de metal pesado encontrada en la planta respecto a la concentración encontrada en el suelo, como se muestra en la ecuación:

$$BCF = \frac{\text{Concentración del metal en planta}}{\text{Concentración del metal en suelo}} \quad (1)$$

Sin embargo, la capacidad fitorremediadora de las plantas depende también de la velocidad en la producción de biomasa (Zhao *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2009). En este sentido, Ghosh y Singh (2005) identifican varias especies de arvenses promisorias para la extracción de cadmio, las cuales presentan BCF menores que plantas acumuladoras, pero alta producción de biomasa, logrando extraer hasta 401 $\mu\text{g/planta}$ durante un ciclo de crecimiento de 90 d.

La toxicidad de los metales pesados, su presencia en aguas de riego en la cuenca media del río Bogotá y las altas concentraciones de cadmio encontradas en lechuga cultivada en la zona, fueron determinantes para la elaboración del presente proyecto. Los objetivos planteados fueron evaluar estrategias sencillas para disminuir la absorción de cadmio en lechuga, manteniendo el riego con aguas contaminadas y determinar el efecto de los tratamientos utilizados en el crecimiento del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cultivo

El experimento se estableció en condiciones de campo, durante los meses de agosto a octubre de 2011 en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el km 12 vía Bogotá-Mosquera, coordenadas 4°42'N 74°12'W, 2.543 msnm, temperatura anual

12,6°C, precipitación 669,9 mm año⁻¹ y brillo solar de 4,2 h d⁻¹ (Miranda *et al.*, 2008a). Se utilizó la variedad de lechuga cresa verde 'Vera' a partir de plántulas obtenidas en la Fundación para el Desarrollo Universitario. Las plántulas se sembraron a una distancia de 40 × 30 cm, en cuatro eras de 33 m de largo por 1,4 m de ancho, utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para los cuatro tratamientos, para un total de 12 unidades experimentales, las cuales se asignaron aleatoriamente.

El agua se suministró de acuerdo con las necesidades del cultivo, a partir del canal de riego del distrito La Ramada, el cual circunda los lotes de cultivo del Centro y se abastece del río Bogotá.

Se realizó un análisis de suelos inicial para determinar su estado y definir las necesidades de fertilización. A partir de los resultados obtenidos se aplicó fertilizante 15-15-15 (N-P-K) en una proporción de 20 g m⁻², a todo el cultivo, exceptuando las unidades experimentales correspondientes al compost, 42 ddt.

El manejo de malezas se realizó manualmente omitiendo las unidades experimentales del tratamiento de arvenses.

Tratamientos

Se realizaron cuatro tratamientos así:

Arvenses: se permitió el crecimiento selectivo de malezas en las parcelas del tratamiento, retirando únicamente los pastos y aquellas plantas que representaran competencia, por sombra, para las lechugas.

CaCO₃: se adicionaron e incorporaron 6.000 kg ha⁻¹ de CaCO₃ al suelo 10 d antes de la siembra, tiempo durante el cual se aplicó agua para mantenerlo a capacidad de campo.

Compost: se incorporaron 87,85 g kg⁻¹ de compost con base en estiércol de cerdo (proveniente

de la sección de porcicultura del Centro Agropecuario Marengo) al momento de preparar las camas para las hortalizas y se mezcló con los 10 cm más superficiales del suelo.

Testigo: las condiciones de densidad de cultivo, riego, fertilización y manejo de malezas fueron iguales a las de CaCO₃.

Muestreo y mediciones

Análisis de suelos

Siguiendo las recomendaciones de Osorio (2006), se retiraron la hojarasca y las plantas, y se tomaron 200 g de suelo de los 20 cm superiores; se repitió el procedimiento en otros cinco puntos, para completar 1 kg de suelo. La muestra se depositó en una bolsa plástica, se marcó y envió a Corpoica Tibaitatá donde se realizó un análisis químico del suelo.

A los 39 y 46 ddt se tomaron 500 g de suelo de cada unidad experimental, se guardaron en bolsas plásticas selladas y se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, según procedimientos estandarizados por el laboratorio.

Cambios de magnitud y evaluación del crecimiento

Las medidas de crecimiento se tomaron los días 0, 11, 25, 32, 39, 46 y 63 ddt. Se seleccionaron cuatro plantas al azar por unidad experimental, provenientes del área útil de parcela, esto es, excluyendo las filas de lechugas ubicadas en los bordes externos de los arreglos, para evitar el efecto de borde.

A las plantas seleccionadas se les midió la altura, mediante regla milimetrada, tomando la máxima elevación de las hojas; posteriormente, fueron extraídas con la totalidad de la raíz y llevadas al laboratorio de Fisiología de Cultivos de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá). En el laboratorio i) las plantas se lavaron con abundante agua y se

secaron; ii) la raíz fue separada del vástago; iii) cada parte fue pesada separadamente en una balanza de precisión Precisa XB2200C; iv) tanto raíz como vástago se secaron por 48 horas a 70 °C en horno WTC Binder hasta alcanzar un peso constante; v) raíz y vástago fueron pesados nuevamente para determinar la masa seca de cada estructura; vi) las muestras secas de vástago se almacenaron en bolsas plásticas selladas para el posterior envío para el análisis de cadmio.

Cuantificación de cadmio

En agua: se tomó una muestra de 500 mL directamente del aspersor de riego y se envió al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) para el análisis por absorción atómica utilizando un equipo Unicam 929AA2041.

En plantas: se realizó un análisis inicial y tres análisis posteriores. Las muestras seleccionadas para los análisis posteriores fueron las de los 32, 39 y 46 ddt debido a que presentaban las lechugas con los mayores tamaños y se incluían todos los tratamientos (después de los 46 ddt las lechugas del tratamiento de compost llegaron a su punto de cosecha). Las muestras se enviaron al laboratorio de Ingeniería Ambiental para el análisis por absorción atómica.

En suelo: se tomaron tres muestras globales el día inicial y una por unidad experimental del muestreo final seleccionado para análisis de cadmio en lechuga (46 ddt), completando en cada caso, un mínimo de 150 g de suelo. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Fisiología de Cultivos, donde fueron secadas a 70°C en un Horno WTC Binder, y fueron enviadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental para el análisis por absorción atómica.

Análisis estadístico

Se utilizó el programa estadístico SPSS, versión 20 (IBM, 2011) para los análisis de varianza

(Anova) y pruebas de comparación de medias por Tukey ($\alpha=0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis completo de suelo

Se encontró una textura franco-arcillosa, 8,3% de materia orgánica, pH moderadamente ácido (5,8), niveles altos de fósforo y azufre (51,9 mg kg⁻¹ y 37 mg kg⁻¹, respectivamente) y no se detectó aluminio. El suelo presentó una conductividad eléctrica (CE) de 1,11 dS m⁻¹. Se presentaron cantidades altas de calcio y sodio (8,91 y 1,62 cmol kg⁻¹, respectivamente), cantidades medias de magnesio y potasio (2,34 y 0,20 cmol kg⁻¹, respectivamente) y un deficiente porcentaje de saturación de potasio. Se encontraron niveles altos de elementos menores (hierro, cobre, manganeso y zinc) y concentraciones medias de boro.

A partir de estos resultados, se determinó que las parcelas correspondientes a Arvenses, CaCO₃ y el testigo, serían tratadas con fertilizante granulado 15-15-15 en una proporción de 20 g m⁻², para suplir las necesidades de nitrógeno, fósforo y potasio del cultivo.

Cadmio en agua

No se encontraron niveles detectables de cadmio (<0,01 mg L⁻¹), siendo concordante con los resultados obtenidos por Miranda *et al.* (2008a) (<0,01 mg L⁻¹). Sin embargo, en el Acuerdo 43 de 2006 de la CAR (2006) se reporta una concentración de 0,003 mg L⁻¹ de cadmio en agua, siendo uno de los pocos estudios que por su grado de sensibilidad permite cuantificar tan bajas concentraciones del metal y evidencia que el agua analizada, a pesar de estar dentro de los límites permitidos por la norma colombiana (<0,01 mg L⁻¹) presenta niveles de contaminación superiores a los establecidos en la reglamentación fran-

cesa que es más restrictiva, con un máximo permisible de $0,001 \text{ mg L}^{-1}$ (Miranda *et al.*, 2008b).

Cadmio en suelos

La tabla 1 muestra que el suelo presentó concentraciones altas del metal, en comparación a los límites de la norma danesa ($0,5 \text{ mg kg}^{-1}$) (Hansen, 2000). De igual forma, las concentraciones encontradas fueron superiores a las reportadas por Miranda *et al.* (2008a), las cuales no superaron los $1,73 \text{ mg kg}^{-1}$ y a las reportadas por González y Mejía (1995) que presentaron un máximo de 2 mg kg^{-1} ; realizados en zonas regadas con agua del río Bogotá

Si bien se considera que las concentraciones fitotóxicas de cadmio están entre los 5 y 10 mg kg^{-1} , las plantas pueden absorber metales aun en bajas concentraciones, introduciéndolo en la cadena alimenticia; aunque a mayores concentraciones en el suelo aumenta su capacidad de absorción y acumulación (Liang *et al.*, 2009; Gosh y Singh, 2005).

En los suelos de la Sabana de Bogotá es posible que el uso constante, por décadas, de agua contaminada halla tenido un efecto acumulativo; las cuencas media y alta demandan $8,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua, siendo la actividad agropecuaria el principal consumidor (CAR, 2006).

Por otro lado, internacionalmente se considera que las principales fuentes de contaminación

por cadmio sobre suelos agrícolas son la deposición atmosférica, la adición continua de fertilizantes, cal, estiércol y lodos de depuradora. En algunos países existen leyes regulatorias para la adición de dichos elementos sobre el suelo, con especial atención en los fertilizantes porque la roca fosfórica de donde se obtienen algunos, contiene naturalmente este tipo de metales pesados (Hansen, 2000; EPA, 2008). Según Sato *et al.* (2010) los metales pesados en estiércol también provienen de la roca fosfórica que es incorporada a la dieta de los animales como suplemento de fósforo inorgánico.

En consecuencia, existen varias causas potenciales para la acumulación de cadmio en el suelo, aunque es probable que el uso del agua contaminada y de fertilizantes fosfóricos, sean fuentes importantes de contaminación en la zona. Adicionalmente, se requieren estudios para definir las causas particulares de la alta contaminación en el Centro Agropecuario Marengo, que llegan a duplicar las ya altas concentraciones de cadmio medidas en otros puntos de la cuenca en años anteriores; evaluar si se debe a la acumulación del metal en el suelo a lo largo del tiempo o a prácticas inapropiadas del lugar.

Por otro lado, los resultados de cadmio en suelo muestran una disminución en la concentración del metal a los 46 ddt en todos los tratamientos respecto a la concentración inicial (tabla 1), siendo significativas ($P \leq 0,05$) en el tratamiento con arvenses. Estos resultados sugieren la extracción de cadmio del suelo por parte del cultivo, especialmente del tratamiento con arvenses.

Tomando como base la alta reducción obtenida en la concentración de cadmio en suelo ($>0,5 \text{ mg kg}^{-1}$) en 46 d de cultivo, los potenciales de fitoremediación podrían considerarse altos. Con los resultados preliminares obtenidos en el presente estudio, se puede calcular en menos de 8 ciclos de 50 d (<400 d) para reducir la concentración de cadmio en suelo desde los niveles encontrados inicialmente ($3,97 \text{ mg kg}^{-1}$), hasta los niveles per-

Tabla 1. Concentración de cadmio en suelo, inicial y a los 46 ddt en los cuatro tratamientos.

Tratamiento	Cadmio en suelo (mg kg^{-1})
Inicial	3,97 a
Arvenses	3,38 b
CaCO_3	3,52 a, b
Compost	3,62 a, b
Testigo	3,41 a, b

El nivel inicial corresponde a las condiciones del suelo antes de realización de cualquier tratamiento y de la instalación del cultivo.

Promedios con letras distintas indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

mitidos por la norma danesa ($0,5 \text{ mg kg}^{-1}$). Estas proyecciones superan ampliamente las calculadas a partir de las modelaciones realizadas por Liang *et al.* (2009), según las cuales, los menores tiempos de fitorremediación se consiguen con tabaco y se pueden calcular en más de 6 años.

Cabe resaltar que dentro de los objetivos de la presente investigación no se encontraba la disminución en la concentración de cadmio en suelo, por lo que se debe profundizar su estudio en cuanto a especies, procedimientos y tiempos, si se quiere implementar la fitorremediación como mecanismo para la descontaminación del suelo por cadmio.

Cadmio en lechuga

Como se observa en la tabla 2 y en la figura 1, la concentración de cadmio en el vástago de lechuga inició en niveles no detectables en el momento de su trasplante, pero presentó niveles considerables en todos los momentos en los que se realizaron nuevas mediciones (32, 39 y 46 ddt).

Teniendo en cuenta únicamente los resultados obtenidos a los 46 ddt, se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0,05$) en la concentración de cadmio a través del Anova, pero la prueba Tukey solo encontró diferencias significativas entre el tratamiento de compost con respecto a los tratamientos de arvenses y CaCO_3 , no entre el de compost y el testigo. Este resultado se explica por la acelerada disminución en las concentraciones de cadmio en las lechugas del

testigo entre los 39 y 46 ddt. Dicho comportamiento puede ser consecuencia de las lluvias que obligaron a disminuir el riego con agua contaminada en el periodo citado, junto al acelerado crecimiento de las lechugas testigo, las cuales duplican su peso fresco en el mismo periodo de tiempo. No obstante, la disminución en la concentración de cadmio también se observa en el tratamiento de compost 7 d antes y no concuerda con período de lluvias.

A pesar de ello, los datos globales muestran que el tratamiento de compost presentó las concentraciones significativamente más bajas ($P \leq 0,05$) de cadmio en lechuga, ya que mantiene promedios inferiores a los otros tratamientos durante los momentos evaluados. Aunque las disminuciones en la concentración obtenida con el uso de compost no alcanzan a ubicar los niveles de cadmio dentro de los límites permitidos para hortalizas de hoja según la Unión Europea ($<0,2 \text{ mg kg}^{-1}$), debe tenerse en cuenta que las concentraciones en el suelo en el que se realizó el ensayo son muy superiores a las de otros puntos de la región, lo que aumenta necesariamente las cantidades de metales absorbidas por las plantas.

Por esta razón, para analizar los resultados obtenidos teniendo en cuenta las condiciones de suelo de otros puntos de la zona, se calculó el factor de bioacumulación (BF) de las lechugas del tratamiento de compost a los 46 ddt ($\text{BF}=0,071$) y se usó con el mayor nivel de cadmio en suelo encontrado en estudios anteriores (2 mg kg^{-1}) (González y Mejía, 1995), obteniendo una con-

Tabla 2. Concentración de cadmio en vástago fresco de lechuga (mg kg^{-1}).

Días después del trasplante	Arvenses	CaCO_3	Compost	Testigo
0	<0,0036 (nd)	<0,0036 (nd)	<0,0036 (nd)	<0,0036 (nd)
32	0,5460	0,5473	0,3562	0,5371
39	0,6726	0,6102	0,2607	0,7601
46	0,6010 a	0,5264 a	0,2558 b	0,4466 a, b

nd, no detectable.

Promedios con letras distintas, a los 46 ddt, indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

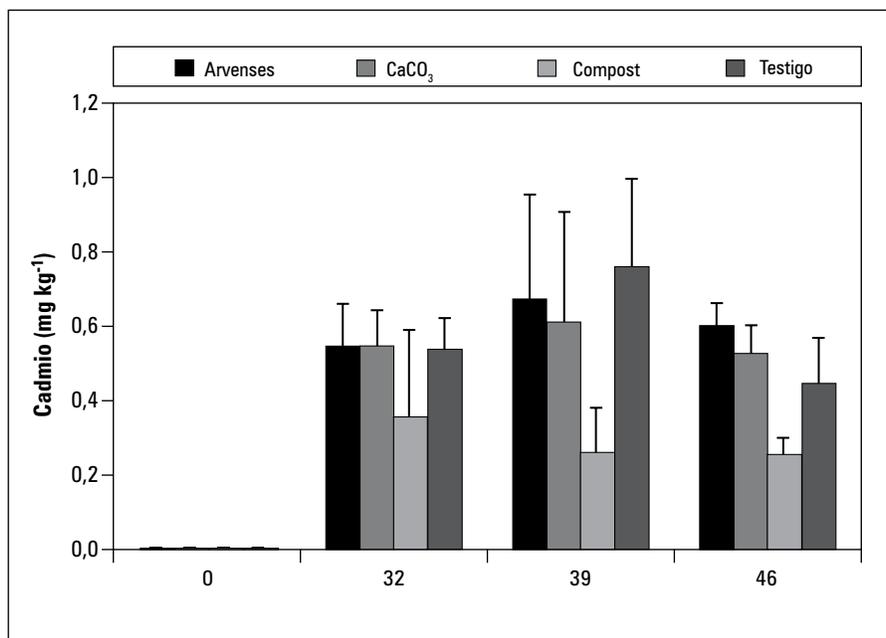


Figura 1. Concentración de cadmio en lechuga fresca por tratamiento.

centración teórica de cadmio en lechuga de $0,143 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que lo ubica dentro del rango permitido para consumo humano.

Los resultados evidencian diferencias estadísticamente significativas entre el pH de diferentes tratamientos (tabla 3). Este comportamiento del pH no se relaciona con el de las concentraciones de cadmio encontradas, por tanto, bajo estas condiciones el pH no parece ser una variable determinante para lograr la menor absorción del cadmio por parte de la lechuga, contrario a lo propuesto por otros autores (Chen *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2009; Lara y Bonilla, 2010).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), los resultados obtenidos en todos los tratamientos fueron mayores a los encontrados por Corpoica en las condiciones iniciales, y los correspondientes al compost fueron significativamente más altos ($P \leq 0,05$) que los de los otros tratamientos. Estos resultados presentan una relación negativa entre la CE y la concentración de cadmio en lechuga, lo que sugiere que mayores conductividades eléctricas disminuyen la absorción del metal. Sin embargo, no se conocen los iones que aporta el compost al suelo y los resultados son contradictorios con los obtenidos en el experimento de Khoshgoftarmensh *et al.* (2002).

Tabla 3. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) del suelo según el tratamiento.

Días después del trasplante	Arvenses		CaCO ₃		Compost		Testigo	
	pH	CE (dS m ⁻¹)	pH	CE (dS m ⁻¹)	pH	CE (dS m ⁻¹)	pH	CE (dS m ⁻¹)
0	5,8	1,1	5,8	1,1	5,8	1,1	5,8	1,1
39	5,3 b	3,5 b	6,1 a	3,6 a	5,7 ab	6,4 a	5,3 a	3,4 b
46	5,4 b	4,2 b	6,0 a	3,9 b	5,8 ab	5,9 a	5,4 b	3,7 b

Los valores del día 0 corresponden a los reportados en el análisis químico inicial.

Promedios con letras distintas entre los tratamientos, a los 39 y 46 ddt, indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

La disminución de la absorción de cadmio puede ser también consecuencia de otras características del compost no evaluadas en el presente estudio, como la mayor cantidad de manganeso y hierro que disminuyen la fitodisponibilidad del cadmio; el complejamiento del cadmio con sustancias húmicas, especialmente grupos carboxílicos; o la coprecipitación del metal con el fósforo (Chen *et al.*, 2010; Sato *et al.* 2010; Liu *et al.*, 2009).

Finalmente, la concentración de cadmio en las lechugas cultivadas con arvenses no presentó reducciones (tabla 2, figura 1). Estos resultados sugieren que a pesar de la mayor extracción del metal del suelo, la utilización de arvenses no sirve para la competencia con las lechugas para la absorción de cadmio.

Crecimiento

Las lechugas presentaron un desarrollo normal, sin síntomas de toxicidad por cadmio como crecimiento retardado o daño externo de la raíz (Gosh y Singh, 2005).

En cuanto a la velocidad de crecimiento, se presentaron grandes diferencias entre las del tra-

tamiento con compost frente a las del resto de plantas (tabla 4, figura 2). Este comportamiento se debe a que el compost animal contiene importante contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y fue incorporado al suelo de las unidades experimentales correspondientes 10 d antes de la siembra de las plántulas, mientras que las lechugas de los otros tratamientos fueron fertilizadas hasta los 42 ddt.

Las lechugas cultivadas con compost presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en el peso fresco del vástago a partir de los 25 ddt, llegaron a un tamaño adecuado para la cosecha desde los 46 ddt y no presentaron ningún síntoma de deficiencia nutricional ni enfermedad. De esta manera se corrobora que el compost sirve como fertilización para las plantas.

Finalmente, el peso fresco del vástago con el tratamiento con CaCO_3 fue ligeramente superior al testigo, pero no presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$); mientras que el tratamiento de arvenses registró un peso fresco del vástago significativamente menor ($P \leq 0,05$), posiblemente por la competencia en la captación de nutrientes.

Tabla 4. Cambios de magnitud de las plantas de lechuga por tratamiento.

ddt	Altura (cm)				Peso fresco vástago (g)				Peso seco vástago (g)			
	Arv	CaCO_3	Cp	Tes	Arv	CaCO_3	Cp	Tes	Arv	CaCO_3	Cp	Tes
0	9,4	9,4	9,4	9,4	2,21	2,21	2,21	2,21	0,11	0,11	0,11	0,11
11	6,3 a	7,0 a	6,0 a	6,1 a	2,38 a'	2,75 a'	2,34 a'	1,90 a'	0,15 a''	0,18 a''	0,14 a''	0,13 a''
25	7,8 a	8,1 a	8,6 a	8,3 a	11,52 a'	11,64 a'	20,09 a'	10,40 a'	0,74 a''	0,74 a''	1,17 a''	0,65 a''
32	9,4 a	9,1 a	10,8 a	8,2 a	36,25 a'	34,68 a'	66,84 a'	27,19 a'	1,84 a''	1,96 a''	3,49 a''	1,52 a''
39	10,8 b	11,4 b	15,9 a	11,1 b	42,79 a'	55,32 a'	176,02 a'	40,59 a'	2,85 a''	3,38 a''	8,40 a''	2,39 a''
46	11,8 b	13,3 b	16,3 a	12,3 a	76,48 a'	103,29 a'	238,61 a'	86,48 a'	4,58 a''	5,41 a''	10,23 a''	4,55 a''
63	15,1 b	15,7 a		15,3 a	172,43 b'	309,51 a'		256,21 b'	9,80 a''	14,33 a''		12,28 a''

Los tratamientos corresponden a arvenses (Arv), carbonato de calcio (CaCO_3), compost (Cp) y testigo (Tes).

Promedios con letras distintas entre los tratamientos, para cada una de las tres variables y al mismo día del trasplante, indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

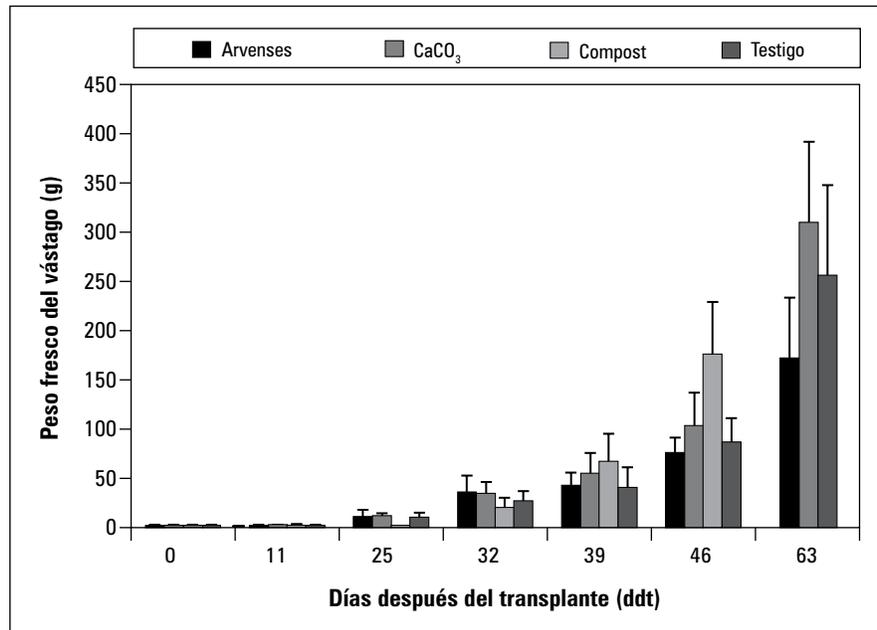


Figura 2. Comportamiento del peso fresco del vástago de lechugas por tratamiento.

CONCLUSIONES

El agua analizada presentó niveles de cadmio dentro de los límites permisibles para uso agrícola por la CAR ya que no fue detectado, sin embargo, la presencia del metal en las aguas no debe descartarse.

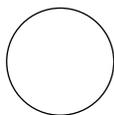
En el suelo del Centro Agropecuario Marengo, los niveles de cadmio fueron superiores a los encontrados en otros puntos de la zona, por lo que es necesario dilucidar las causas de esta diferencia ya que la alta contaminación de los suelos se ve estrechamente relacionada con la igualmente alta contaminación de las lechugas analizadas.

El aporte de compost al suelo de los cultivos de lechuga disminuyó significativamente la concentración de cadmio en las plantas. El alto contenido de nutrientes en el compost permitió un crecimiento rápido de las plantas, por lo que podría reemplazar total o parcialmente el uso de fertilización química.

El crecimiento de arvenses en las parcelas no generó una disminución en la concentración de cadmio en las lechugas, mientras que disminuyó su peso fresco. Con el uso de arvenses se consiguió una disminución en la concentración de cadmio en los suelos, lo que muestra un potencial uso de las arvenses para fitorremediación de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Diego Miranda por su asesoría, la consecución de la financiación y las facilidades generadas para el desarrollo del proyecto; al ingeniero agrónomo Carlos Carranza por la información y gestión administrativa; al personal del Centro Agropecuario Marengo y de los laboratorios de la Facultad de Agronomía por su apoyo. Finalmente a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), quien financió el proyecto a través de los "Semilleros de Creación e Investigación de la DIB".



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAR. 2006. Acuerdo Número 43 del 17 de Octubre de 2006 "Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020". Corporación Autónoma Regional (CAR), Bogotá.
- CAR. 2009. Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental: Versión final. Río Bogotá, adecuación hidráulica y recuperación ambiental. Corporación Autónoma Regional (CAR), Bogotá.
- Chen, H.S., Q.Y. Huang, L. Liu, P. Cai, W. Liang y M. Li. 2010. Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: influence on growth of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.). *Pedosphere* 20(1), 63-70.
- Curtis, L. y B. Smith. 2002. Heavy metal in fertilizers: Considerations for setting regulations in Oregon. Oregon Department of Agriculture, Salem, OR.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2008. State of the Environment Report. EPA, Wexford, Irlanda.
- Ghosh, M. y S.P. Singh. 2005. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. *Environ. Pollut.* 133(2), 365-371.
- González, S. y L. Mejía. 1995. Contaminación con cadmio y arsénico en suelos y hortalizas de un sector de la cuenca del río Bogotá. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Hansen, O.C. 2000. Cadmium in fertilizers. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen.
- IBM. 2011. SPSS Statistics. Programa estadístico SPSS, versión 20. Nueva York, NY.
- Khoshgoftarmensh, A.H., B. Jaafari y H. Shariatmadari. 2002. Effect of salinity on Cd and Zn availability. Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Lara, R. y H. Bonilla. 2010. Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista UDCA Act. & Div. Cient.* 13(2), 61-70.
- Liang, H.M., T.H. Lin, J.M. Chiou y K.C. Yeh. 2009. Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy metal hyperaccumulators and non-hyperaccumulators. *Environ. Pollut.* 157, 1945-1952.
- Liu, L., H. Chen, P. Cai, W. Liang y Q. Huang. 2009. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *J. Hazard. Mater.* 163, 563-567.
- Miranda, D., C. Carranza, C.A. Rojas, C.M. Jeréz, G. Fischer y J. Zurita. 2008a. Acumulación de metales pesados en suelos y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* 2(2), 180-191.
- Miranda, D., C. Carranza y G. Fischer. 2008b. Calidad del agua de riego en la Sabana de Bogotá. Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá.
- Nomiyama, K. y H. Nomiyama. 1998. Cadmium-induced renal dysfunction: New mechanism, treatment and prevention. *J. Trace Elements Exp. Med.* 11(2-3), 275-288.
- Osorio, N.W. 2006. Muestreo de suelos. En: Universidad Nacional de Colombia, <http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/muestreo.pdf>; consulta: junio de 2011.
- Sato, A., H. Takeda, W. Oyanagio, E. Nishihara y M. Murakami. 2010. Reduction of cadmium uptake in spinach (*Spinacia oleracea* L.) by soil amendment with animal waste compost. *J. Hazard. Mater.* 181(1-3), 298-304.
- Unión Europea. 2006. Reglamento (CE) No 1831/2006 Por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. En: Eur-Lex, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:ES:PDF>; consulta: octubre de 2011.
- Winter, H. 1982. The hazards of cadmium in man and animals. *J. Appl. Toxicol.* 2(2), 61-67.
- Zhao, F.J., E. Lombi y S.P. Mc Grath. 2003. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil* 249, 37-43.