

EVALUACIÓN DE TRES ESPECIES NATIVAS DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE PARA USO EN FITORREMEDIACIÓN

Evaluation of Three Native Species from the Chihuahuan Desert for use in Phytoremediation

G. O. Núñez-Montoya¹, M. T. Alarcón-Herrera^{2‡}, A. Melgoza-Castillo³, F. A. Rodríguez-Almeida¹ y
M. H. Royo-Márquez³

RESUMEN

El desarrollo de fitotecnologías para reducir la contaminación de agua y suelo es de gran importancia. Los objetivos del presente trabajo fueron: evaluar la tolerancia de las especies *Eleocharis macrostachya*, *Schoenoplectus americanus* y *Sporobolus airoides* a dosis crecientes de arsénico, en condiciones de inundación, y cuantificar la acumulación de As en la fitomasa. Las plantas se colectaron en campo y se mantuvieron con 5 cm de agua por arriba del sustrato durante todo el experimento. Se midió altura, número de brotes y número de inflorescencias. Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones y los datos se sometieron a un análisis de varianza. La altura, el número de brotes y las inflorescencias no se vieron afectados ($P > 0.05$) por los tratamientos; sólo el As tuvo efecto negativo sobre el número de brotes en *S. airoides* ($P < 0.05$). Se midió la acumulación de As, tanto en la fitomasa aérea como en la raíz. Por cada mililitro de arsénico adicionado al suelo, la concentración en las plantas aumentó y se registraron las siguientes concentraciones en las plantas: en *E. macrostachya* se tuvo un incremento de As de $0.215 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y de $0.155 \mu\text{g g}^{-1}$ en la raíz. En *S. americanus*, la concentración aumentó $0.085 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y $0.127 \mu\text{g g}^{-1}$ en la raíz. En *S. airoides*, la concentración aumentó $0.055 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y $0.046 \mu\text{g g}^{-1}$ en la raíz. Se determinaron los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) y se encontró que las especies *E. macrostachya* y *S. americanus* tienen potencial para fitorremediación de áreas inundadas contaminadas con

As. El pasto *S. airoides* acumuló As sólo en la dosis de 9 mg L^{-1} y no soporta condiciones de inundación prolongada.

Palabras clave: arsénico, *Eleocharis macrostachya*, *Schoenoplectus americanus*, *Sporobolus airoides*, factor de bioconcentración, factor de translocación.

SUMMARY

The development of phytotechnologies for the reduction of water and soil pollution is important. The objectives of this work were to evaluate the tolerance of the species *Eleocharis macrostachya*, *Schoenoplectus americanus*, and *Sporobolus airoides* to increasing doses of arsenic in flood conditions and to quantify As accumulation in their phytomass. The plants were collected in the field and kept in substrate under 5 cm water. The height, number of sprouts, and number of flowers were measured. Every treatment had five repetitions and the data were submitted to a variance analysis. The height, number of sprouts, and number of flowers were not affected ($P > 0.05$) by the treatments. As had only a negative effect on the number of sprouts in *S. airoides* ($P < 0.05$). As accumulation was measured in both aerial phytomass and roots. The concentration of this metal increased and the following concentrations were registered for every milliliter of As added to the medium: in *E. macrostachya*, the As increment was $0.215 \mu\text{g g}^{-1}$ in the aerial part and $0.155 \mu\text{g g}^{-1}$ in the roots. In *S. Americanus*, the concentration increased $0.085 \mu\text{g g}^{-1}$ in the aerial part and $0.127 \mu\text{g g}^{-1}$ in the roots. *S. airoides* showed the least increase, with $0.055 \mu\text{g g}^{-1}$ in the aerial part and $0.046 \mu\text{g g}^{-1}$ in the roots. Bioconcentration (FBC) and translocation (FT) factors were determined, and it was found that the species *E. macrostachya* and *S. americanus* have potential for the phytoremediation of flooded areas contaminated with As. The grass *S. airoides* accumulated As only in the 9 mg L^{-1} dose and cannot tolerate prolonged flood conditions.

¹Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Av. Miguel de Cervantes 120, 31109 Chihuahua, México

[‡] Autor responsable (teresa.alarcon@cimav.edu.mx)

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana. Chihuahua, México.

Index words: *arsenic*, *Eleocharis macrostachya*, *Schoenoplectus americanus*, *Sporobolus airoides*, *bioconcentration factor*, *translocation factor*.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es un problema local, regional y mundial que incide en todas las actividades humanas (Miller, 1994). La alta concentración de contaminantes disueltos, como el arsénico, puede hacer el agua impropia para beber, dañar a los peces y otras formas de vida acuáticas, reducir el rendimiento agrícola y acelerar la corrosión del equipo que usa agua (Castro y Wong, 1999).

La fitorremediación es un método que utiliza plantas para descontaminar suelos y lodos, así como para el tratamiento de agua, lo que representa ventajas económicas y ecológicas (Kuschik, 2004). El tiempo que toma descontaminar un sitio depende de diversos factores. Entre los más importantes están: tipo y número de plantas que se emplean, tipo y cantidad de sustancias químicas presentes, tamaño y profundidad del área contaminada, tipo de suelo y condiciones ambientales presentes (US-EPA, 2003). La fitorremediación, mediante diversas técnicas, puede utilizarse para reducir, estabilizar o transformar una amplia variedad de contaminantes (Miller, 1996). Existen diversas especies con uso potencial en fitorremediación: *Thlaspi caerulescens* llega a acumular hasta 30 000 $\mu\text{g g}^{-1}$ de zinc (Kochian, 2000); *Pteris vittata*, 22 630 $\mu\text{g g}^{-1}$ de arsénico en hojas (Ma *et al.*, 2001); *Pityrogramma calomelanos*, 8000 $\mu\text{g g}^{-1}$ en hojas y 88 $\mu\text{g g}^{-1}$ en raíz (Fitz y Wenzel, 2002). Todas estas plantas se consideran hiperacumuladoras. Fitz y Wenzel (2002) reportaron como plantas tolerantes al As a *Agrostis capillaris*, con 3470 $\mu\text{g g}^{-1}$, y *Cynodon dactylon*, con 12 450 $\mu\text{g g}^{-1}$. La fitorremediación se conoce también como tecnología verde y tiene bajo costo e impacto ambiental, al compararse con otros métodos para descontaminar (Kochian, 2000). Schnoor (2002) reportó costos de \$24 711 a \$61 777 dólares por hectárea para fitorremediación, mientras que las técnicas convencionales pueden costar hasta \$617 775 dólares por hectárea. Dependiendo de la profundidad y el tipo de contaminación del suelo, con fitorremediación se han reportado costos entre \$25 y \$100 dólares por tonelada de suelo. Los reportes de costos de fitorremediación de aguas se encuentran entre \$0.16 y \$1.59 dólares por 1000 L de agua tratada (Raskin y Ensley, 2000).

La selección de las especies que se utilizaron para este trabajo se basó en que *Eleocharis macrostachya* y *Schoenoplectus americanus* se observaron en sitios inundados, donde las concentraciones de As son altas; *Sporobolus airoides* se incluyó debido a que crece en lugares inundados al menos temporalmente y con altas concentraciones de sales en la región desértica de Chihuahua (Royo y Melgoza, 2001). En este estudio, las tres especies se sometieron a concentraciones crecientes de As para evaluar su potencial de aplicación en la fitorremediación de sitios contaminados con el metaloide, en función de los efectos en el desarrollo y los factores de bioconcentración y translocación de las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Eleocharis macrostachya Britt es una planta herbácea, nativa, perenne, de la familia de los juncos (Cyperaceae). Presenta hasta 60 cm de altura, con rizomas color café rojizos, de 30 cm de largo y hasta 2.5 mm de diámetro. *Schoenoplectus americanus* Pert. es una planta herbácea, nativa, perenne, que pertenece a la familia de los juncos (Cyperaceae). Mide hasta 2 m de alto, con rizomas largos y fuertes. Los tallos individuales están en pequeños grupos, en forma triangular. *Sporobolus airoides* (Torr.) Torr. es una planta herbácea, nativa, perenne, que pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae). Mide de 0.5 a 1 m de alto.

Las especies *E. macrostachya* y *S. americanus* se colectaron en campo. Las plantas de *E. macrostachya* se obtuvieron de un humedal cercano a la población de Naica, Chihuahua, México, entre 27° 50' 81" N y 105° 28' 99" O. Las plantas de *S. americanus* se colectaron en la población de San Diego de Alcalá, Chihuahua, en los manantiales de esta localidad, entre 28° 35' 27" N y 105° 32' 88" O. Las plantas del zacate *S. airoides* se obtuvieron mediante siembra en invernadero. Las plantas de *E. macrostachya* y *S. americanus* colectadas se propagaron en suelo sin arsénico y, posteriormente, se separaron en módulos (de dos a cinco tallos) y se colocaron en macetas en invernadero. El pasto *S. airoides* se trasplantó directamente en las macetas (30 cm de alto y 25 cm de diámetro). Éstas se llenaron con 7 kg de arena, como sustrato; las plantas se mantuvieron en inundación con 5 cm de agua, por encima de la superficie durante todo el experimento. Las plantas

de *E. macrostachya* y *S. americanus* tuvieron un precondicionamiento de 47 días y *S. airoides* de 13 días. El precondicionamiento consistió en aplicar, dos veces en cada maceta, 0.25 L de una solución nutritiva comercial utilizada para cultivos hidropónicos [macroelementos (80%) y microelementos (20%)]. Arena de río con diámetro granulométrico entre 1 y 6 mm se usó como sustrato.

Después del precondicionamiento, se asignaron completamente al azar cuatro tratamientos con cinco repeticiones, incluyendo al testigo en cada especie. Los tratamientos consistieron en la adición de soluciones de arsénico de las concentraciones: 0, 3, 6 y 9 mg L⁻¹ de arsenito de sodio (NaAsO₂), la adición fue semanal, por un periodo de cuatro meses; la acumulación final del metaloide en las unidades experimentales fue de: 17.63, 35.25 y 52.88 mg L⁻¹ de As. Cada semana se midieron las variables: número de brotes, inflorescencias y altura de la planta.

Al final del trabajo, se tomaron aleatoriamente dos macetas de cada tratamiento, para evaluar la concentración del As en la parte aérea y raíz. Ambas secciones se lavaron, primero con agua potable y después con agua tridestilada. Posteriormente, se colocaron en bolsas de papel y se secaron a una temperatura de 40 °C durante siete días. Del material seco y molido de las plantas, se tomó una muestra de 0.5 g, la cual se sometió a digestión con ácido nítrico. Las muestras se dejaron reposar por 12 h y se prosiguió con la predigestión en un horno de microondas, de acuerdo con el método recomendado por CEM (2002). Posteriormente, se llevó a cabo la digestión con peróxido de hidrógeno a 30%. La cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica, equipado con generador de hidruros (marca: GBC, Modelo Avanta Σ).

Los factores de bioconcentración y translocación se determinaron de acuerdo con los criterios establecidos por Fitz y Wenzel (2002). El factor de bioconcentración se calculó al dividir la concentración del metaloide en la fitomasa de la planta (μg g⁻¹) entre la concentración del elemento en el suelo (μg g⁻¹). El factor de translocación se determinó dividiendo la concentración de la fitomasa aérea (μg g⁻¹) entre la concentración de la fitomasa de la raíz.

Para las variables altura, brotes e inflorescencias, los datos se analizaron por especie, mediante un modelo para un diseño experimental de parcelas divididas en el tiempo, con PROC MIXED de SAS (SAS Institute,

1998). Para probar el efecto del tratamiento se utilizó como término del error el factor planta dentro del tratamiento, mientras que para probar la interacción de tratamiento por fecha (número de semanas) se usó como término del error la interacción fecha por planta dentro de tratamiento. Para determinar la respuesta a las dosis aplicadas de As, en términos de concentraciones acumuladas de estos elementos en la parte aérea y en la raíz de las plantas al final de la prueba, se ajustaron modelos de regresión lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eleocharis macrostachya

Para altura de la planta, número de brotes e inflorescencias, en general, no se observaron efectos ($P > 0.05$) de las diferentes dosis de arsénico.

La acumulación de arsénico por la especie mostró un comportamiento lineal en las dos partes en que se dividió la fitomasa. Del total de la variación de la concentración del metaloide en la parte aérea 95% está explicado por la adición del arsénico en la solución utilizada, mientras que en la raíz lo explica en 79%. Con la dosis más alta, esta especie presentó 10.79 μg g⁻¹ en la parte aérea y 9.06 μg g⁻¹ en la raíz. De acuerdo con las ecuaciones presentadas en la Figura 1, la concentración de arsénico en la planta aumentó 0.215 μg g⁻¹ en la parte aérea y 0.155 μg g⁻¹ en la raíz por cada miligramo de arsénico adicionado en el sustrato. En el Cuadro 1 se presentan los valores para As con sus respectivos factores de bioconcentración y translocación; estos valores indican que *E. macrostachya* es tolerante a dosis de 3 y 6 mg L⁻¹ y, a dosis de 9 mg L⁻¹ se comporta como acumuladora de As. Esto explica el porqué no se observaron diferencias entre tratamientos. La especie acumula el metaloide en forma proporcional a las dosis aplicadas. Sin embargo, de acuerdo con los factores de bioconcentración y translocación obtenidos, según los criterios de clasificación establecidos por Fitz y Wenzel, la planta se clasifica como tolerante y acumuladora (Fitz y Wenzel, 2002).

Este fenómeno se presenta en algunas plantas hiperacumuladoras que, por sus características biológicas, tienen la capacidad de traslocar los elementos en forma proporcional a la dosis (Ma *et al.*, 2001).

Schoenoplectus americanus

Para altura de la planta, número de brotes e inflorescencias, en general, no se observaron efectos ($P > 0.05$) de las diferentes dosis de arsénico.

La acumulación de arsénico por la especie mostró un comportamiento lineal en las dos partes en que se dividió la fitomasa. Del total de la variación de la concentración en la parte aérea, 98% está explicado por la adición de arsénico y en la raíz 77%, de acuerdo con las dosis aplicadas de este elemento. Con la dosis más alta, esta especie presentó $4.76 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y $7.58 \mu\text{g g}^{-1}$ en la raíz. La concentración aumentó en la parte aérea en $0.085 \mu\text{g g}^{-1}$ y en la raíz en $0.127 \mu\text{g g}^{-1}$ por cada mg L^{-1} que se adicionó (Figura 2). En el Cuadro 1 se presentan los factores de bioconcentración y translocación para As. Estos valores indican que *S. americanus* es acumuladora bajo las dosis de 3 y 6 mg L^{-1} ; al aumentar la concentración a 9 mg L^{-1} , el factor de translocación disminuye a valores menores de uno, por lo que la planta pasa a ser tolerante.

Sporobolus airoides

Para altura de la planta e inflorescencia, en general, no se observaron efectos ($P > 0.05$) de las diferentes dosis de arsénico, sólo se tuvo efecto sobre número de brotes ($P < 0.05$).

Cuadro 1. Factores de bioconcentración y translocación por especie presentados en las diferentes concentraciones de arsénico.

Especie	Dosis mg L^{-1}	Factor de bioconcentración	Factor de translocación
<i>Eleocharis macrostachya</i>	3	3.45	0.18
	6	3.00	0.94
	9	2.76	1.20
<i>Schoenoplectus americanus</i>	3	1.75	1.16
	6	1.09	2.09
	9	1.72	0.64
<i>Sporobolus airoides</i>	3	0.89	0.44
	6	0.37	0.75
	9	0.88	1.01

En todos los tratamientos, las plantas iniciaron con siete brotes; en la Semana 2, aumentaron todos los tratamientos entre ocho y 11 brotes, en la Semana 3 se observó que todos los tratamientos disminuyeron entre seis y ocho brotes (Figura 3). El tratamiento testigo y el de 6 mg L^{-1} , de la Semana 5 a la 16, se mantuvieron entre siete y nueve brotes. En el tratamiento de 3 mg L^{-1} , a partir de la Semana 5, aumentó el número de brotes; se observó que al acumularse el metaloide con esta dosis se estimula la producción de brotes. De acuerdo con otros estudios, dicha respuesta puede atribuirse a la competencia del P con el As por los sitios de adsorción

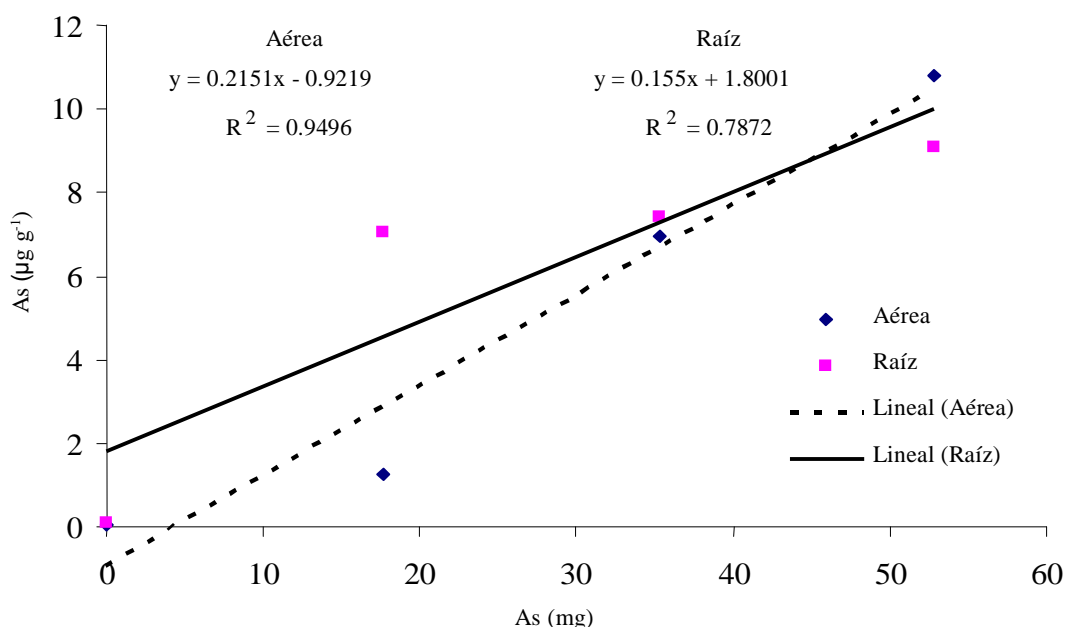


Figura 1. Concentración total de arsénico ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la especie *Eleocharis macrostachya*, al exponerse a diferentes dosis de arsenito de sodio.

en el suelo y al mecanismo de transporte de ambos en la planta. Esto se atribuye a que el As y el P pertenecen al mismo grupo químico y tienen un comportamiento similar en el suelo (Carbonell *et al.*, 1998; Fitz y Wenzel, 2002; Pivetz, 2001). El tratamiento de 9 mg L^{-1} , a partir de la Semana 3 hasta la 16, decreció a cinco brotes y la tendencia se mantuvo hasta el final del tratamiento. El menor número de brotes se presentó en la dosis más alta de As, lo que indica que la planta es afectada a estas concentraciones de As.

La cantidad acumulada de arsénico por la especie mostró un comportamiento lineal en las dos partes en que se dividió la fitomasa (Figura 4). Del total de la variación de la concentración en la parte aérea, 79% está explicado por la adición de arsénico y, en la raíz, 74%, de acuerdo con las dosis aplicadas de este elemento. Con la dosis más alta, esta especie presentó $3.19 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y $3.14 \mu\text{g g}^{-1}$ en la raíz. La concentración aumentó en $0.055 \mu\text{g g}^{-1}$ en la parte aérea y en la raíz en $0.046 \mu\text{g g}^{-1}$, por cada mg L^{-1} que se adicionó (Figura 4). En el Cuadro 1 se presentan los valores para As con sus respectivos factores de bioconcentración y translocación. Estos valores indican que *S. airoides* empieza a traslocar a dosis de 9 mg L^{-1} . Sin embargo, el factor de bioconcentración sigue siendo

menor de uno, por lo que la planta se clasifica como tolerante (Fitz y Wenzel, 2002).

CONCLUSIONES

- *Eleocharis macrostachya* tiene potencial como fitorremediadora para As, debido a que no se observaron efectos negativos en la planta con las dosis estudiadas. *Schoenoplectus americanus* es acumuladora de As a dosis de 3 a 6 mg L^{-1} y, al aumentar la dosis a 9 mg L^{-1} , pasa a ser tolerante. Ambas especies muestran tener potencial para ser consideradas en la fitorremediación de sitios contaminados con As.

- *Sporobolus airoides* empieza a traslocar arsénico a dosis de 9 mg L^{-1} . Sin embargo, al aumentar la concentración de éste, el número de brotes disminuyó. Esta especie no es recomendable para la fitorremediación de suelos en condiciones de inundación prolongada.

LITERATURA CITADA

- Carbonell, A. A., M. A. Aarabi, R. D. DeLaune, R. P. Gambrell y W. H. Patrick. 1998. Arsenic in wetland vegetation: availability, phytotoxicity, uptake and effects on plant growth and nutrition. *J. Sci. Total Environ.* 217: 189-199.
- Castro-Esparza, M. L. y M. Wong. 1999. Remoción de arsénico a nivel domiciliario. Disponible en: <http://>

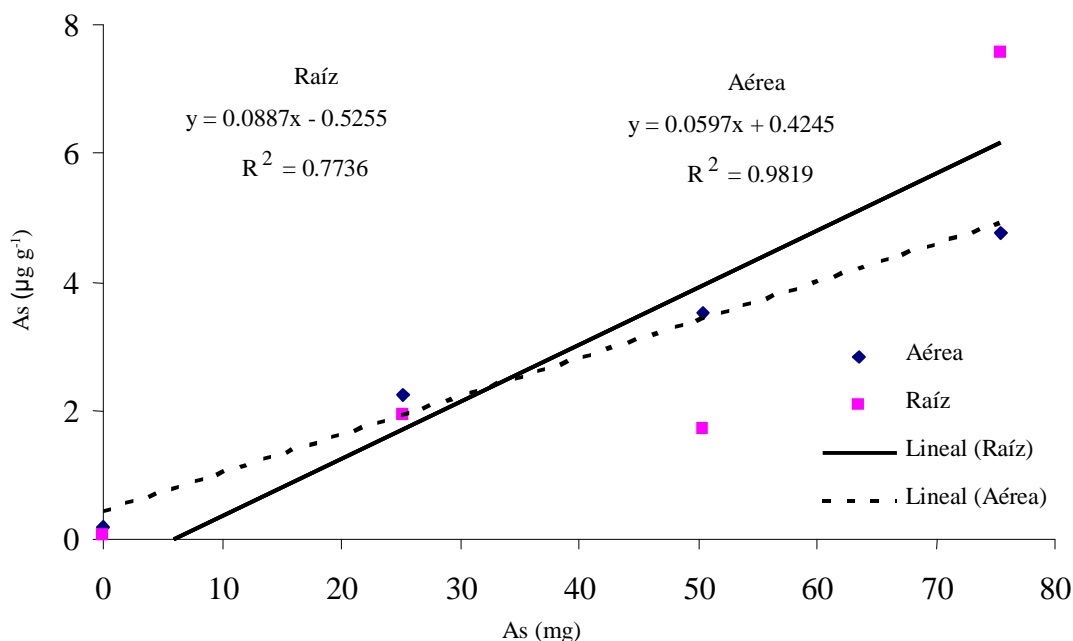


Figura 2. Concentración total de arsénico ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la especie *Schoenoplectus americanus*, al exponerse a diferentes dosis de arsenito de sodio.

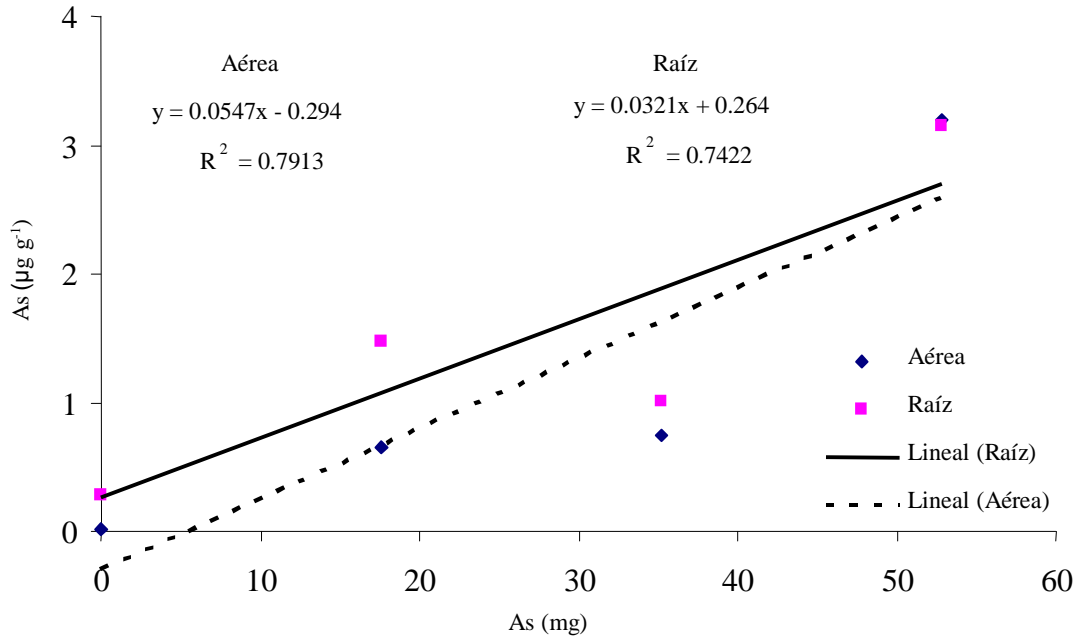


Figura 3. Concentración total de arsénico (µg/g) en la especie *Sporobolus airoides*, al exponerse a diferentes dosis de arsenito de sodio.

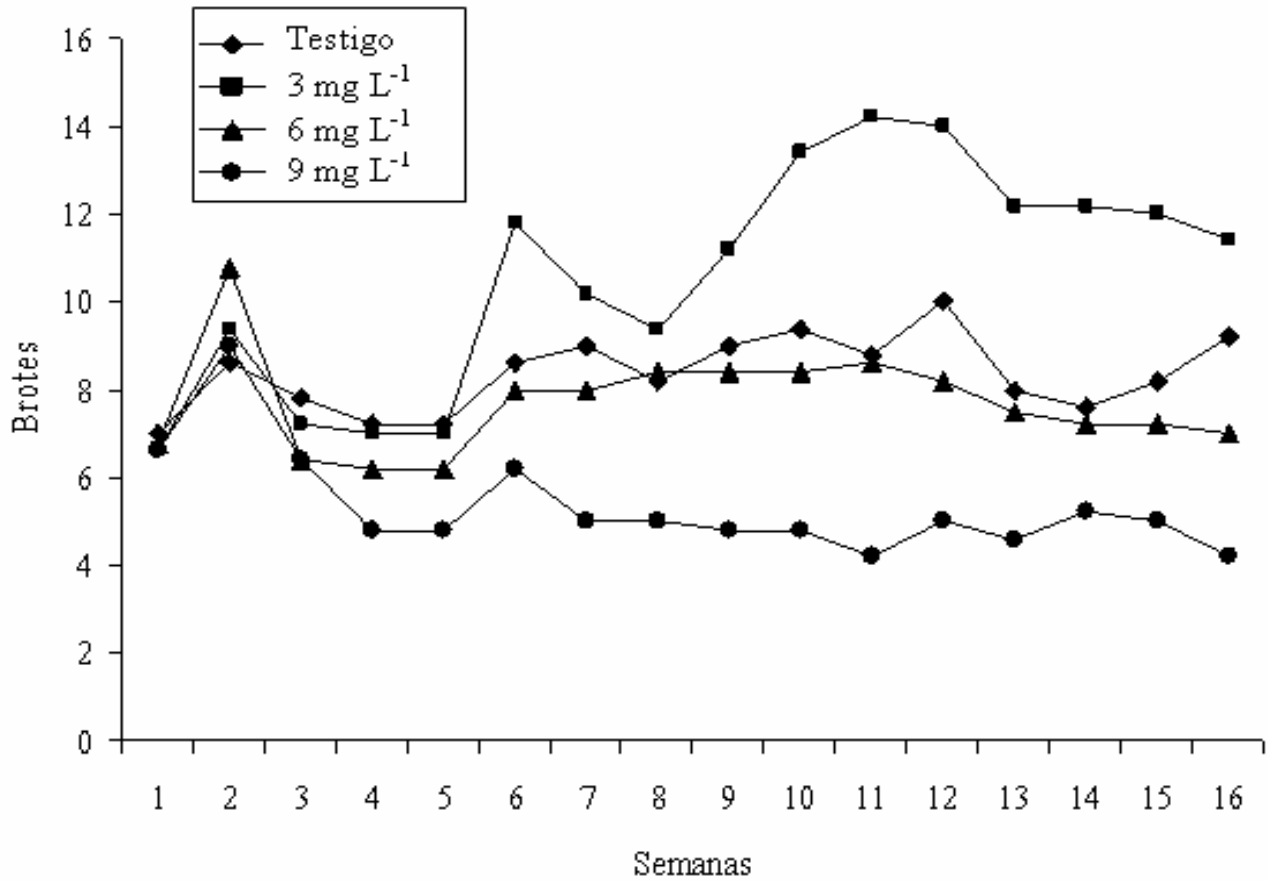


Figura 4. Medias de los cuadrados mínimos, para el número de brotes en relación con los niveles de arsénico por semana, en *Sporobolus airoides*.

- www.ingenieroambiental.com/arsenico/remocionarsenicosalta.htm (Consultado: 28 de febrero, 2004)
- CEM Corporation. 2002. User's manual. Digestion system. Disponible en: <http://www.cem.com/pages/mars5.htm>. USA. (Consultado: 28 de abril, 2004).
- Fitz, W. J. y W. W. Wenzel. 2002. Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Biotechnology* 99: 259-278.
- Kochian, L. V. 2000. Phytoremediation, using plants to clean up soil agricultural research. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/Jun00/soil0600.pdf>. (Consultado: 15 de diciembre, 2003).
- Kusch, P. 2004. UFZ. Centre for Environmental Research. Phytoremediation. Disponible en: <http://www.ufz.de/index.php?en=3566>. (Consultado: 28 de abril, 2004)
- Ma, L. Q., K. M. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai y E. Kennelley. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Disponible en: <http://lqma.ifas.ufl.edu/PUBLICATION/MA-01A.PDF>. (Consultado: 22 de abril, 2004)
- Miller, G. T. 1994. Ecología y medio ambiente: introducción a la ciencia ambiental, en desarrollo sustentable a la conciencia de conservación del planeta. 7a ed. Iberoamérica. México, D. F.
- Miller, R. R. 1996. Ground-water remediation technologies analysis center. GWRTAC Phytoremediation of soil and groundwater. TO-96-02 (6-7). http://www.gwrtac.org/pdf/Horiz_o.pdf. (Consultado: 22 de abril 2004)
- Pivetz, B. E. 2001. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. Disponible en: http://www.epa.gov/ada/download/issue/epa_540_s01_500.pdf. (Consultado: 11 de marzo, 2004)
- Raskin, I. y B. D. Ensley. 2000. Phytoremediation of toxic metals. Using plants to clean up the environment. Wiley Interscience. Hoboken, NJ, USA.
- Royo-Márquez, M. H. y A. Melgoza. 2001. Listado florístico del Campo Experimental La Campana y usos de su flora. *Técnica Pecuaria en México* 39: 105-126.
- SAS Institute. 1998. User's guide: Proc-Mixed. Ver. 8.2. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schnoor, J. L. 2002. Ground-water remediation technologies analysis center GWRTAC Phytoremediation of soil and groundwater. TE-02-01 (19-24). Disponible en: http://www.gwrtac.org/pdf/phyto_e_2002.pdf. (Consultado: 3 de marzo, 2004)
- US-EPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. A citizen's guide to phytoremediation. United States Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf>. (Consultado: 28 de julio, 2003).