

BIOACUMULACIÓN DE ARSÉNICO EN LAS ETAPAS DE DESARROLLO DE LA CEBADA MALTERA (*Hordeum distichon* L.)*

IARSENIC BIOACCUMULATION IN THE STAGES OF DEVELOPMENT OF MALT BARLEY (*Hordeum distichon* L.)

Francisco Prieto García^{1§}, Judith Prieto Méndez¹, Judith Callejas Hernández¹, Alma Delia Román Gutiérrez¹ y María Aurora Méndez Marzo²

¹Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo, km 4.5. C. P. 42076. Pachuca, Hidalgo, México. (jud_292003@yahoo.com.mx), (Judith_callejas@yahoo.com.mx) y (aroman@uaeh.edu.mx). ²Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo, km 4.5. C. P. 42076. Pachuca, Hidalgo, México. (jumafran@yahoo.es). [§]Autor para correspondencia: prietog@uaeh.edu.mx.

RESUMEN

La contaminación por arsénico en aguas y suelos de Zimapán, Hidalgo, México; origina que la cebada maltera (*Hordeum distichon* L.) acumule este elemento. El objetivo fue determinar los niveles de bioacumulación de arsénico en órganos y tejidos de cebada bajo condiciones controladas, en diferentes etapas de desarrollo de la planta. Se cultivó la cebada en 25 macetas, cinco por cada uno de cinco ensayos diferenciados, incluyendo controles negativos (suelo y agua no contaminados) y positivos. Se utilizaron cinco semillas por macetas y se evaluó la acumulación de arsénico en cada uno de los órganos: raíz, tallo, hoja, espiga y grano, en cada una de las cinco etapas de desarrollo consideradas: formación del coleoptilo o aparición de la primera hoja; amacollamiento u hojas verdaderas a partir de la axila foliar; etapa de “encañado” o primer nudo separado del suelo donde aparecerán las primeras espigas, espigamiento y llenado de granos. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con tres tratamientos: con arsénico, control positivo y control negativo. Se realizaron cinco réplicas por tratamiento. El cultivo presentó una elevada acumulación de arsénico en sus diferentes etapas de desarrollo, directamente proporcional al tiempo de exposición. La raíz presentó la más alta concentración de arsénico acumulada (100 y 300 mg kg⁻¹), seguida por las hojas (80 a 180 mg kg⁻¹) y el tallo

(70 a 110 mg kg⁻¹). El nivel de acumulación de arsénico en granos resultó entre 40-90 mg kg⁻¹, que de acuerdo a normas argentinas, pueden considerarse como altamente contaminados. En índice de bioacumulación (IBA), las hojas presentaron los valores más altos, clasificando como niveles medios (0.1-1) para plantas verdes. Este índice se utilizó como indicativo para estimar niveles de contaminación por arsénico en suelos. En el tallo se presentaron los mayores valores de IBA; por lo tanto, este órgano sirvió como indicador específico del cultivo para estimar niveles de contaminación por arsénico.

Palabras clave: bioacumulación, contaminación, cultivo, planta.

ABSTRACT

The contamination by arsenic in water and ground of Zimapán, Hidalgo, Mexico, causes that malt barley (*Hordeum distichon* L.) grown in this region, accumulates this element. The objective was to measure the levels of arsenic accumulated in organs and tissues of barley under controlled conditions, at different stages of development.

* Recibido: enero de 2009
Aceptado: febrero de 2010

Malt barley cv. Esmeralda was grown in 25 pots, five pots per differentiated trial. Trials include negative (not contaminated ground and water) and positive controls. Five plants by pot were used and the accumulation of arsenic in each one was evaluated in five organs: root, stem, leaf, glean and grain, at each of five stages of development (coleoptiles formation or first leaf, macollo or true leaves from an armpit first knot that becomes present separated from the ground and forms the first spike, formation of spikes and seed filling). A random block design with three treatments was used: with arsenic, positive control and negative control. Malt barley presented high accumulation of arsenic at different stages of development, directly proportional to the time of exposition. Roots presented the highest accumulation of arsenic (100 and 300 mg kg⁻¹), followed by leaves (80 to 180 mg kg⁻¹) and stem (70 to 110 mg kg⁻¹). The level of accumulation of arsenic in grains was between 40-90 mg kg⁻¹, amount that according to Argentinean norms can be considered as highly contaminated. For the bioaccumulation index (BI), the leaves presented the high values, classified as medium values (0.1-1) for green plants. This organ can be indicative of contamination level in the ground. The largest values for the BI were observed in the stem, this organ can be a malt barley specific indicator of the level of arsenic contamination.

Key words: bioaccumulation, contamination, crop, plant.

INTRODUCCIÓN

La acumulación de metales pesados en sedimentos y suelos, por adsorción y/o coprecipitación u otras formas de asociación natural, puede acarrear a la larga consecuencias negativas para el entorno ecobiológico. Las variaciones del medio circundante a los sólidos y sedimentos pueden producir la lixiviación de cantidades significativamente elevadas al estado disuelto, y con ello accesibles a los sistemas acuosos y seres vivos (Prieto *et al.*, 2005a). No sólo resulta de interés, el conocimiento de los niveles de concentración total de los elementos metálicos que se encuentren acumulados en suelos; sino además, aquellas concentraciones acumuladas en tejidos vegetales de alta sensibilidad, que provocan daños en seres humanos y animales, a través de productos de consumo (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

La toxicidad o actividad biológica de un elemento en particular, como el arsénico, sus mecanismos de transporte y propagación, movilidad o capacidad reaccionante;

pueden variar drásticamente dependiendo de la forma química concreta en que se encuentre y las concentraciones permisibles (Galvão y Corey, 1989). En general, la absorción de elementos traza por las plantas se ve afectado por la disponibilidad específica del cultivo en cuestión, y otros factores del suelo; entre los que se pueden señalar el pH, potencial redox (Eh), el contenido de materia orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el régimen del agua (riegos), el contenido de arcilla (textura del suelo), el balance y concentración de nutrientes (Kabata-Pendias y Pendias, 2000). También las condiciones climáticas parecen influir en la absorción, generalmente una temperatura ambiental influye en una mayor absorción de elementos traza en la planta (Martínez, 2000; Hingston *et al.*, 2001). El contenido de metales en alimentos tanto de origen vegetal como animal dependen de los métodos de producción y procesado y del lugar de origen del alimento, especialmente relacionado con la composición del suelo (Lucho *et al.*, 2005).

El concepto de bioacumulación, se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación (IBA); se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en un organismo vivo y la concentración de ese contaminante en el suelo (Kabata-Pendias y Pendias, 2000). Debido a su toxicidad, el arsénico es un contaminante de cultivos y se señala por algunos autores que puede ser absorbido por las plantas en concentraciones similares a la que se tengan en los suelos donde son cultivados (O'Neill, 1990). La acumulación del arsénico es mayor en las raíces, que en las semillas y los frutos. En algunos casos, niveles de arsénico tan bajos como de 0,7 mg kg⁻¹ pueden reducir el rendimiento de los cultivos en 50% (Peterson y Girling, 1980). Para el ganado, la ingestión de arsénico directamente del suelo corresponde a 60-75% de la exposición total al arsénico (Núñez, 1999).

La ciudad de Zimapán en el estado de Hidalgo, México; pertenece a la región hidrológica RH-26 del Pánuco, parte norte de la Cuenca del Valle de México, y se ubica en la subcuenca del Río Moctezuma. Los contenidos de arsénico natural resultan evidentes, debido a la presencia de minerales arsenicales como la arsenopirita, FeAsS ó FeS₂FeAs₂; Rejalgar, As₂S₂; Oropimento, As₂S₃; Loellingita, FeAs₂ y Tennantita, Cu₁₂As₄S₁₃, entre otros (Cárdenas, 1992; Núñez, 1999; Prieto *et al.*, 2006). Así también, las actividades mineras de la zona pueden traer como consecuencia un incremento en el contenido de arsénico (Galvão y Corey, 1989) en las aguas de los pozos, norias y manantiales de

la región, rebasando los límites máximos permitidos por la normativa oficial mexicana (NOM, 1994); por lo que la población que actualmente se estima cercana a los 42 000 habitantes (Pérez, 2004), estén afectadas por este elemento (Batsheba, 1996; Armienta *et al.*, 1997). Se ha reportado contenidos promedio de arsénico en esta región a niveles de 12.74 mg kg⁻¹ (Prieto *et al.*, 2005a; Prieto *et al.*, 2007).

La cebada maltera es el segundo cultivo en importancia socioeconómica del estado de Hidalgo, México; es una planta monocotiledónea anual perteneciente a la familia de las gramíneas y está representada por dos importantes especies cultivadas; *Hordeum distichon* L., y *Hordeum hexastichon* L. El desarrollo del cultivo se produce en cinco etapas: formación del coleoptilo, formación del macollo, etapa de encañado, etapa de espigadura y llenado de granos (ARSUS, 1998). El objetivo fue evaluar el nivel de acumulación de arsénico en órganos de la planta de cebada en diferentes etapas de desarrollo y crecimiento, así como estimar los índices de bioacumulación (IBA) para este cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomó una muestra compuesta de suelo del poblado El Salitre, del municipio de Zimapán, estado de Hidalgo, México. Este suelo ha sido cultivado sistemáticamente y se considera un suelo contaminado ya que sus contenidos de arsénico oscilan entre 10.45-13.58 mg kg⁻¹ (Prieto *et al.*, 2005a). Se realizó la toma de muestra en un área de 600 m², considerando una profundidad de 30 cm de suelo (capa arable). De igual forma, se tomaron muestras compuestas de un suelo de la región del municipio de Actopan, también en el estado de Hidalgo, pero consideradas como no contaminadas por arsénico (< 2 mg kg⁻¹). Las muestras de los diferentes suelos fueron sometidas a homogenización y cuarteo para el llenado de 25 macetas y posterior siembra de las semillas de cebada. Las semillas de cebada que se utilizaron fueron de la variedad Esmeralda D-130 (*Hordeum distichon* L.), suministrada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Hidalgo. Se realizó al suelo análisis según la NOM (2000).

El agua utilizada para el riego de las macetas, fueron tomadas del distribuidor general de agua potable de Zimapán y agua del pozo de Pachuca, Hidalgo; las primeras con contenidos de arsénico de 0.40 mg L⁻¹ y las segundas sin este elemento (< 0.008 mg L⁻¹). Los riegos se realizaron dos

veces al mes con cantidades de 500 ml de agua por maceta. Se analizaron las características del agua de acuerdo con la NOM (1994).

Se colocaron cinco réplicas de macetas por cada una de las cinco series experimentales (de A a E). La serie A, con suelo de Zimapán (SZ) del poblado EL Salitre, regado con agua del distribuidor general de agua potable de Zimapán (AZ); se le llamó a esta serie experimento I. La serie B con SZ, regado con agua de Pachuca (AP) tomada de un pozo local denominándose experimento II; esta serie se realizó con el propósito de evaluar el efecto del arsénico contenido en el suelo solamente. La serie C con suelo de Actopan (SA), regado con AZ, definiéndolo como experimento III; en esta serie se evalúa la incidencia del arsénico contenido sólo en el agua. La serie D con SA, regado con AP que fue definida como control negativo; es decir, en ausencia de arsénico. Finalmente y como control positivo, la serie E con SZ, regado con agua contaminada (AC) con arseniatos (partiendo de NaH₂AsO₄ grado reactivo) adicionados con concentraciones 10 veces superiores a la del agua AZ (4 mg L⁻¹).

En cada maceta se sembraron cinco semillas para obtener cinco réplicas por análisis. La acumulación de arsénico se evaluó como un índice relativo al contenido en suelo y agua. Se tomó en cuenta la concentración de arsénico como la media bioacumulada por órgano del cultivo para cada etapa de desarrollo, con relación a la cantidad de arsénico total en el agua y suelo mediante la siguiente ecuación:

$$IBA = \frac{(As)_{pc}}{(As)_{a+s}}$$

Donde: IBA = índice de bioacumulación; (As)_{pc} = concentración de arsénico, en mg kg⁻¹ de la parte del cultivo en evaluación; (As)_{a+s} = concentración total de arsénico en mg kg⁻¹ como suma de agua y suelo.

Se evaluaron los órganos del cultivo en cada una de las cinco etapas de desarrollo y crecimiento, indicadas anteriormente, simbolizándose por S (semilla), R (raíz), H (hojas), T (tallo), E (espiga) y G (grano) y el subíndice correspondiente según la etapa de que se trate. Para todos los resultados fueron calculados los valores medios. Se realizó un análisis de varianza para evaluar diferencias significativas entre órganos, etapas del desarrollo del cultivo y la incidencia del arsénico en agua y suelo. Los resultados del análisis de suelo y los obtenidos por órganos del cultivo están expresados en base seca.

En esta investigación se utilizó un diseño experimental de bloques al azar considerando tres tratamientos con arsénico, un control positivo y un control negativo, y se realizaron cinco réplicas de análisis por cada órgano en cada etapa del cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis efectuado en las propiedades físico-químico de los suelos de Zimapán (SZ) y de Actopan (SA) en fase inicial se observó que ambos presentan pH moderadamente alcalinos (7.5 y 9), que son reductores

intermedios del potencial redox -50 y -150 mV, y contenidos medios de materia orgánica entre 1 y 5%, clasificación según Kabatas-Pendias y Pendias (2000), que corresponden con valores obtenidos en otros trabajos (Flores *et al.*, 1997). Sin embargo, los suelos SZ y SA, difieren en sus valores de conductividad eléctrica, humedades, texturas y contenidos de arsénico (Cuadro 1). El SA al ser cuatro veces más arcilloso que el SZ, es capaz de retener tres veces más humedad lo cual puede estar asociado con contenidos en MO ligeramente superiores a los SZ. Por su parte los elevados contenidos de arsénico en SZ, corresponden con reportes anteriores en esa misma zona (Armenta *et al.*, 1997; Prieto *et al.*, 2005a y 2005b).

Cuadro 1. Valores promedios de los análisis fisicoquímicos de suelo y agua.

| Variables | pH | Eh (mV) | CE (dS m ⁻¹) | MO (%) | N total (%) | As (mg kg ⁻¹) | Humedad (%) | Textura (%) | |
|-----------|--------|------------|-----------------------------|-----------|----------------|------------------------------|----------------|-------------|-------|
| | | | | | | | | Arcilla | Arena |
| SA | 8.14 a | 81.84 a | 2.38 a | 2.27 b | 0.78 a | 1.66 a | 19.08 a | 26 a | 42 a |
| SZ | 7.9 a | 70.34 a | 0.22 b | 1.7 b | 0.14 b | 12.74 b | 6.33 b | 7 b | 73 b |
| AP | 8.4 a | -86.2 a | 0.69 a | <0.02 a | sd | 0.008 a | sd | sd | sd |
| AZ | 7.5 b | -61.6 b | 0.52 a | <0.02 a | sd | 0.4 b | sd | sd | sd |

SA= suelo de Actopan; SZ= suelo de Zimapán; AP= agua de Pachuca; AZ= agua de Zimapán; Eh= potencial redox; CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; As= arsénico; sd= sin dato; a, b= letras diferentes, indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

En el mismo Cuadro 1, se observan los resultados de los análisis del agua (AP y AZ) que se utilizaron para los riegos. Ambas reflejaron características similares y que difieren en los contenidos de arsénico; las características del agua Zimapán (AZ) recopilado de Báez *et al.* (2004), presentó una concentración de arsénico 20 veces por encima de lo que establece la norma (NOM, 1994); en tanto las particularidades del agua de Pachuca (AP), compilados de Pérez (2004) y Prieto *et al.* (2006); los contenidos de arsénico fueron menores al límite de detección (LD= 0.008 mg L⁻¹). EL pH moderadamente alcalino puede favorecer la absorción del arsénico que se lixivie del suelo, así como los contenidos medios de materia orgánica, favorecen su migración al formar complejos organometálicos estables en medios acuosos (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

El contenido de arsénico en las semillas sembradas fue de 0.0137 mg kg⁻¹. A pesar que en México no está normado el contenido de arsénico permisible en granos o

semillas de cebada, según la normatividad de Argentina, cantidades menores a 0.2 mg kg⁻¹, se pueden considerar como libres de arsénico (Prieto *et al.*, 2005b).

Se ha observado que el cultivo de cebada presenta un alto nivel de acumulación de arsénico. Éste es absorbido por la planta, del que se encuentra acumulado en el suelo y que puede llegar a lixiviar al medio acuoso durante el proceso de riego, unido al arsénico que también esté presente o disponible en las propias aguas de riego.

El experimento I, manifiesta la influencia del arsénico en el SZ y del AZ. Se obtuvo para la semilla en la primera etapa del desarrollo, la concentración más alta de arsénico fue 1.249 mg kg⁻¹; tomando en cuenta que al ser sembrada posee una concentración de 0.0137 mg kg⁻¹; es decir, se incrementó unas 100 veces. Sin embargo, es oportuno indicar que no es una parte comestible de la planta y a través del desarrollo esta desaparece.

El experimento II, (SZ y AP) se tiene también para la semilla la concentración más alta (0.926 mg kg^{-1}), en el experimento III, (SA y AZ), nuevamente la concentración es más alta en la semilla (0.931 mg kg^{-1}). Se observa que la incidencia SZ y AZ hacen un efecto de casi suma en la acción de bioacumulación de arsénico lixiviado; que por separado la incidencia del AZ y el SZ son similares. En el experimento IV, (SA y AP, control negativo) se observó una mínima cantidad de arsénico (0.018 mg kg^{-1}). En el experimento V, (SZ y AC, control positivo) se tiene también la máxima concentración de arsénico para la semilla (3.11 mg kg^{-1}).

Entre experimentos, para la raíz, semilla y hoja; como era de esperarse se tienen las concentraciones más altas de arsénico. El experimento III, presentó mayor bioacumulación de arsénico en general, con respecto a los obtenidos en los experimentos II, lo que significa que en III, el AZ tiene mayor influencia que el SZ. En los experimentos del I al IV, la concentración más alta de arsénico siempre se presentó en la semilla. Ahora comparando con la concentración inicial ($0.0137 \text{ mg kg}^{-1}$) se absorbió alrededor de 70 veces

esa concentración en el experimento II y III, para el experimento I, 90 veces, el IV sólo 1.5 veces. Este comportamiento puede explicarse ya que para la germinación de la semilla necesita cierta humedad en el grano cuatro veces más que la inicial.

En general se presentaron las máximas concentraciones de arsénico en la raíz, después de desaparecer la semilla (a partir de la tercera etapa de desarrollo), esto se explica por el simple hecho de que la raíz es el medio por el cual las plantas absorben los nutrientes del suelo, sucede lo mismo con las hojas donde son un destino determinado de los nutrientes. Los tallos por su parte siguen en orden de bioacumulación, debido a que son órganos de transporte de los nutrientes y en las distintas etapas del crecimiento se bioacumula en éste el arsénico.

En el Cuadro 2, se muestran los valores de arsénico (mg kg^{-1}) acumulado por órganos del cultivo en los experimentos. Se resaltan niveles de acumulación en raíces, hojas y tallos, así como los efectos de la concentración de arsénico en agua y en la solución del suelo.

Cuadro 2. Valores promedios de arsénico (mg kg^{-1}) acumulado por órganos del cultivo de cebada en los diferentes experimentos.

| Etapa y órgano | A | B | C | D | E |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1Raíz | 0.901 | 0.4808 | 0.904 | 0.405 | 3.117 |
| 1Semilla | 1.249 | 0.926 | 0.934 | 0.7998 | 1.38 |
| 1Hoja | 0.834 | 0.672 | 0.8039 | 0.641 | 3.02 |
| 2Raíz | 0.755 | 0.2623 | 0.3668 | 0.2273 | 4.283 |
| 2Semilla | 0.2195 | 0.2309 | 0.359 | 0.1825 | 3.151 |
| 2Hoja | 0.652 | 0.4774 | 0.6916 | 0.4387 | 1.55 |
| 2Tallo | 0.4768 | 0.2899 | 0.372 | 0.1822 | 1.491 |
| 3Raíz | 0.945 | 0.567 | 1.392 | 0.21 | 15.56 |
| 3Hoja | 0.773 | 0.626 | 0.847 | 0.458 | 2.238 |
| 3Tallo | 0.518 | 0.552 | 0.3172 | 0.4058 | 1.4744 |
| 4Raíz | 1.006 | 0.9694 | 0.888 | 0.7814 | 50.3 |
| 4Hoja | 1.338 | 0.861 | 0.4054 | 0.298 | 106.2 |
| 4Tallo | 0.983 | 0.6292 | 0.4094 | 0.3242 | 14.98 |
| 4Espiga | 1.088 | 0.615 | 1.262 | 0.521 | 2.81 |
| 4Grano | 0.633 | 0.627 | 0.6146 | 0.4751 | 1.6220 |
| 5Raíz | 2.922 | 1.089 | 2.051 | 0.1896 | 21.59 |
| 5Hoja | 1.731 | 1.2236 | 3.443 | 0.708 | 33.13 |
| 5Tallo | 1.075 | 0.7756 | 1.903 | 0.107 | 28.98 |
| 5Espiga | 1.149 | 1.761 | 1.633 | 1.059 | 4.622 |
| 5Grano | 0.65 | 0.569 | 0.8261 | 0.517 | 1.6676 |

No se indican los resultados de la serie E o experimento V (control positivo), por cuanto el nivel de contaminación por arsénico resultó excesivo y a partir de la tercera etapa de desarrollo las plantas morían o se secaban totalmente.

En la Figura 1, se muestran los IBA de arsénico y de manera similar se aprecia que los mayores niveles se alcanzaron en raíces, hojas y tallos. Pero además en granos de cebada se observó que los niveles de bioacumulación fueron de 0.8 mg

de arsénico por kg de grano, lo cual excede 4 veces los índices normados como límites máximos permisibles para arsénico en granos, según la norma Argentina (Prieto *et al.*, 2005b).

En la Figura 1, se hace notar que los niveles de acumulación de arsénico en espiga y granos son igualmente elevados (40-90 mg kg⁻¹), por tal razón, se puede inferir que provocan afectaciones al cultivo que los invalidan para producciones de malta o incluso como forraje para ganado.

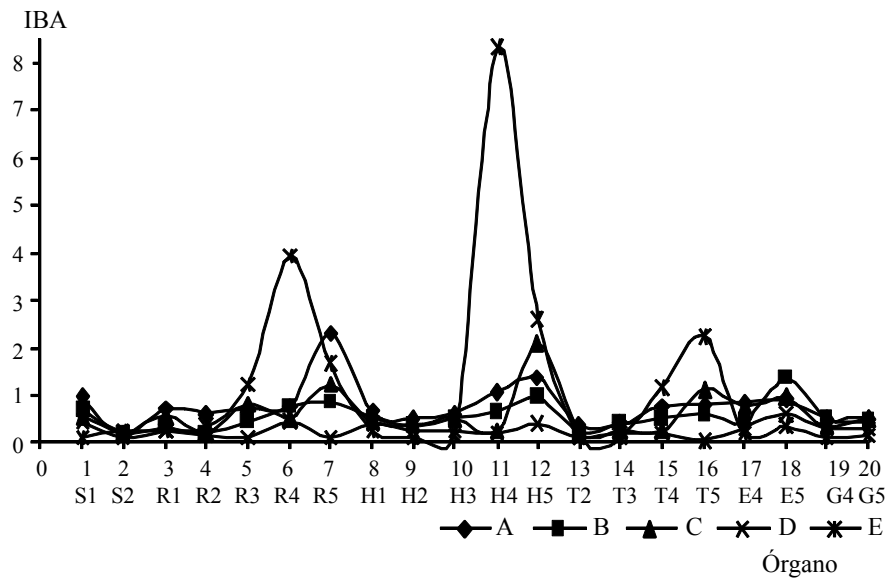


Figura 1. Índice de bioacumulación (IBA) de arsénico en cultivo de cebada. Donde: S= semilla; R= raíz; H= hojas; T= tallo; E= espiga; G= grano; A, B, C, D y E= experimentos.

Adicionalmente en la etapa final de desarrollo de la cebada se caracterizó las propiedades físicas ésta, en la cual se hizo una evaluación por cada experimento. En el Cuadro 3, se puede notar el drástico resultado en el experimento V o control positivo y las diferencias

en los experimentos I, II y III, comparados con las condiciones típicas del cultivo de la columna siete (Dendy y Dobraszcyk, 2004). Obviamente se compara el control negativo o experimento IV con el cultivo normal de la cebada.

Cuadro 3. Características físicas en la etapa de llenado de granos en cebada.

| Variables | Experimento I SZ-AZ | Experimento II SZ-AP | Experimento III SA-AZ | Experimento IV SA-AP | Experimento V* SZ-AC | Condiciones típicas del cultivo |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Ramificación en raíz | Abundante | Abundante | Media | Abundante | Baja | Abundante |
| Altura de la planta | 27 cm | 35 cm | 32 cm | 64 cm | 21 cm | 60-150 cm |
| Número de macollos | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3-5 |
| Hojas | Rizadas largas y angostas amarillas | Rizadas largas y angostas amarillas | Rizadas largas y angostas amarillas | Rizadas largas y angostas amarillas | Rizadas largas y angostas amarillas y quemadas | Rizadas largas y angostas amarillas |

SA= suelo de Actopan; SZ= suelo de Zimapán; AP= agua de Pachuca; AZ= agua de Zimapán; AC= agua contaminada; * = plantas que sobrevivieron al final de los experimentos.

Cuadro 3. Características físicas en la etapa de llenado de granos en cebada (continuación).

| Variables | Experimento I SZ-AZ | Experimento II SZ-AP | Experimento III SA-AZ | Experimento IV SA-AP | Experimento V* SZ-AC | Condiciones típicas del cultivo |
|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|
| Número de espigas | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 4-6 |
| Llenado de granos | Uniforme | Uniforme | Uniforme | Uniforme | Uniforme | Uniforme |
| Tamaño de granos | 5-6 mm | 6-7 mm | 5-6 mm | 7-8 mm | 5 mm | 7-8 mm |

SA= suelo de Actopan; SZ= suelo de Zimapán; AP= agua de Pachuca; AZ= agua de Zimapán; AC= agua contaminada; * = plantas que sobrevivieron al final de los experimentos.

Son evidentes los daños causados en ramificación de raíces y tamaño o altura de la planta, que pone de manifiesto otros efectos que puede provocar la presencia de arsénico en tejidos vivos, raquitismo o daños al crecimiento (Prieto *et al.*, 2006b). También son evidentes las disminuciones en números de macollo y espigas y en los tamaños de granos. Se pudo apreciar además, el daño en raíces en los experimentos I, II y V con la presencia de aparentes tumoraciones como se observan en la imagen de la Figura 2. Estas tumoraciones deberán ser estudiadas con más detenimiento para evaluar su origen, causas y efectos sobre el cultivo.



Figura 2. Presencia de tumoraciones en las raíces del cultivo de *Hordeum distichon* L., al final de los experimentos (SZ y AZ).

CONCLUSIONES

Se concluye que la cebada presenta un alto nivel de acumulación de arsénico; que es absorbido por la planta desde el suelo y que es mayor en raíces que en frutos. Así también, el arsénico que puede llegar a lixiviar por el suelo al medio acuoso durante el proceso de riego, que unido al

arsénico presente o disponible en el agua de riego, producen un efecto suma que agrava o incrementa los niveles de bioacumulación de arsénico en la cebada.

A pesar que la cebada tiene un período de desarrollo relativamente corto, es capaz de bioacumular altas concentraciones de arsénico, que permite definir este cultivo como un posible indicador biológico de la contaminación de suelos por arsénico. En la raíz se presentaron altas concentraciones de arsénico acumuladas, seguidas por las hojas y tallo; pero éste último órgano él IBA posee valores más altos, los cuales sirven como órganos particulares y específicos del cultivo para estimar los niveles de contaminación por arsénico.

Finalmente se deduce la importancia del nivel de acumulación de arsénico observado en granos (órgano comestible) que resultó ser relativamente alto (40-90 mg kg⁻¹); y de acuerdo a la norma argentina pueden considerarse altamente contaminados; asimismo, los daños físicos causados en relación al tamaño y forma de las vainas y granos.

LITERATURA CITADA

- Agricultural Research Service Department of Agriculture (ARS-USDA). 1998. Barley: origin, botany, culture, winterhardness, genetics, utilization, pests. Agriculture Handbook N° 338. Agricultural Research Service United States Department of Agriculture, Washington, D. C. USA. 127 p.
- Armienta, M. A.; Rodríguez, R.; Aguayo, A.; Cisneros, N.; Villaseñor, G. and Cruz, O. 1997. Arsenic contamination of groundwater at Zimapan, Mexico. J. Hydrol. 5:39-46.
- Batsheba, A. G. 1996. Drinking water regulations in the United States of America. Government Affairs Coordinator. Dallas Water Utilities. USA. 1-15 pp.

- Báez-Ramírez A.; Prieto-García, F. y Galán-Vidal, C. A. 2004. Bioacumulación y daños genotóxicos en pez cebrá (*Danio rerio*) por arsénico en aguas de Zimapán, Hidalgo, México. Ensayos a corto plazo. *AquaTIC*. 21:62-70.
- Cárdenas, V. J. 1992. Geological-mining monograph of the State of Hidalgo. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica. Consejo de Recursos Minerales. México. Publication M-3e. 96 p.
- Dendy, D. A. V. y Dobraszczyk, B. J. 2004. Cereales y productos derivados, química y tecnología. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 403-421 pp.
- Flores, L.; Hernández, G. and Maples, M. 1997. Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico City. *Water, air and soil Pollution*. 98:364-372.
- Galvão, L. A. y Corey, C. G. 1989. Arsénico. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. Serie vigilancia. Núm. 3. 70 p.
- Hingston, J. A.; Collins, C. D.; Murphy, R. J. and Lester, J. N. 2001. Leaching of chromated copper arsenate wood preservatives: a review. *USA. Envir. Pollution*. 111:53-66.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants, CRC Press LLC. Third edition. USA. 27 p.
- Lucho-Constantino, C. A.; Prieto-García, F.; del Razo, L. M.; Rodríguez-Vazquez, R. and Poggi-Varaldo, H. 2005. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ*. 108:57-71.
- Martínez-Pezina, H. F. 2002. Estudio de la acumulación de los metales pesados en cultivos de secano, en el distrito de riego 03 del valle del Mezquital. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. 22-27 p.
- Norma Oficial Mexicana (NOM), 1994. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*. 12 p.
- Norma Oficial Mexicana (NOM), 2000. NOM-021-RECNAT-2000. Estudios, muestreos y análisis. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. *Diario Oficial de la Federación*. 17 p.
- Núñez, B. J. 1999. Evaluación hidrológica de la cuenca de Zimapán y sus implicaciones con la presencia de arsénico. Informe final. IICT-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. 113 p.
- O'Neill, P. 1990. Arsenic. Heavy metals in soils. *In*: Alloway, B. J. (ed). Editorial Blackie. London, U. K. 83-99 pp.
- Pérez Moreno, F. 2004. Lixiviación y precipitación de arsénico en aguas y lodos de pozos del distribuidor general de Zimapán, Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, México. 17-23 pp.
- Peterson, P. and Girling, C. 1980. Other trace metals. Impact of heavy metal pollution on plants. Effects of trace metals on plant function, N. Lepp (ed.), London: Applied Science Publishers.
- Prieto, F.; Callejas, J.; Lechuga, M. A.; Gaytán, J. C. y Barrado, E. 2005a. Acumulación de arsénico en tejidos vegetales, proveniente de aguas y suelos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Bioagro*. 17(3):129-135.
- Prieto, F.; Lechuga, M. A.; Méndez, M. A.; Barrado, E. y Callejas, J. 2005b. Daños tóxicos en tejidos vegetales sensibles producidos por aguas contaminadas con arsénico en Zimapán, Hidalgo, México. *Bioagro*. 17(3):137-141.
- Prieto, F.; Perez, F. y Barrado, E. 2006a. Lixiviación selectiva de arsénico y otros elementos de material sedimentario arrastrado por aguas subterráneas en Zimapán, Hidalgo, México. *Interciencia*. 31(1):50-56.
- Prieto, F.; Báez, A.; Scott, W.; Gaytán, J. y Zúñiga, A. 2006b. Acumulación toxicidad y teratogénesis por presencia de arsénico en aguas en pez cebrá (*Danio rerio*). *AquaTIC*. 24:72-85.
- Prieto, F.; Callejas, J.; Román, A. D.; Prieto, J.; Gordillo, A. J. y Méndez, M. A. 2007. Acumulación de arsénico en el cultivo de habas (*Vicia faba*). *Agron. Costarricense*. 31(2):101-109.