

Efecto genotóxico y citotóxico del plomo en meristemas radiculares de dos variedades de *Vicia faba* L. y su relación con la domesticación

Genotoxic and cytotoxic effect of lead in two varieties of *Vicia faba* L. radicular meristems and their relationship with domestication

Garnica-Acuña S. J.¹, López-Herrera M.¹✉, Romero Bautista L.¹, Meza Sánchez M.¹

¹Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

✉ Autor para correspondencia: maritzalh2003@gmail.com

Recibido: 15/04/2019

Aceptado: 15/05/2019

RESUMEN

Las problemáticas ambientales asociadas al incremento de metales pesados como el plomo han promovido la búsqueda de bioindicadores eficientes; *Vicia faba* es uno de los más utilizados, sin embargo, su aprovechamiento a nivel mundial ha provocado el uso indistinto de sus variedades silvestres y domesticadas, sin considerar las implicaciones del proceso de domesticación. Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto genotóxico y citotóxico del plomo en células meristemáticas de raíz de semillas de *V. faba* silvestre y de la variedad *Major* (domesticada) a través de la presencia de micronúcleos y la determinación del índice mitótico, con la finalidad de conocer sus respuestas ante este metal y su relación con la domesticación, así como sugerir el uso de la variedad más sensible como bioindicador. Para ello, los meristemas radiculares se sometieron a tratamientos con 0, 0.005, 0.01 y 0.02 g L⁻¹ de acetato de plomo y se realizaron tinciones con aceto-orceína; se obtuvo la frecuencia de micronúcleos y el índice mitótico por cada 1000 células observadas. Los resultados obtenidos indican que el acetato de plomo tiene un efecto genotóxico y citotóxico diferencial entre ambas variedades, siendo *V. faba* var. *Major* la que presenta una alta sensibilidad al metal pesado, debido a una pérdida en la resistencia al estrés, por lo que se sugiere su uso como bioindicador; mientras que en las semillas silvestres mostraron mayor tolerancia al tener un bajo grado de domesticación.

Palabras clave: Metal pesado, haba, micronúcleos, mitosis, bioindicador

ABSTRACT

The environmental problems associated with the increase of heavy metals such as lead have promoted the search for efficient bioindicators; *Vicia faba* is one of the most used, however, its worldwide employ has led to the indiscriminate use of its wild and domesticated varieties, without considering the implications of the domestication process. For this reason, the objective of this research was to evaluate the genotoxic and cytotoxic effect of lead in meristematic root cells in wild *V. faba* and variety *Major* (domesticated) seeds through the presence of micronuclei and the determination of the mitotic index, in

order to know their responses to this metal and its relationship with domestication, as well as suggest the use as a bioindicator of the variety more sensitive. To do this, the root meristems were exposed to treatments with 0, 0.005, 0.01 and 0.02 g L⁻¹ of lead acetate and stained with aceto-orcein; the frequency of micronuclei and the mitotic index were obtained per 1000 cells observed. The results obtained indicate that lead acetate has a differential genotoxic and cytotoxic effect between both varieties, being *V. faba* var. *Major* which has a high sensitivity to heavy metal, due to a loss of stress resistance, so its use as a bioindicator is suggested; while the wild seeds showed greater tolerance by having a low degree of domestication.

Keywords: Heavy metal, broad bean, micronuclei, mitosis, bioindicator.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados constituye una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial, debido a que genera importantes cambios en los factores bióticos y abióticos, así como en la dinámica global, afectando la calidad de los ecosistemas y los servicios que proveen; lo cual reduce el bienestar de los seres vivos y en el caso de la especie humana, ocasiona conflictos sociales y económicos (Khan *et al.*, 2015).

Los metales pesados son elementos químicos con una alta densidad y que presentan toxicidad en altas concentraciones, siendo capaces de alterar las funciones metabólicas y fisiológicas de los seres vivos. De manera general, se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo a su funcionalidad biológica, ya que algunos de ellos como el B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn, son requeridos como oligoelementos; mientras que, en el otro grupo, se incluyen aquellos que no presentan un papel biológico conocido y exhiben una alta toxicidad inclusive en bajas concentraciones, tales como el Pb, Cd, Hg, Sb, Bi, Sn y Tl (Nagajyoti *et al.*, 2010; Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

A pesar de que estos se encuentran naturalmente en la corteza terrestre en forma de iones, sales, minerales y otros compuestos

químicos, las actividades antropogénicas han sido responsables del aumento en su movilidad y presencia en el ambiente, entre las que destacan la minería, metalurgia, actividades industriales, vertido de residuos de construcción, industriales y domésticos, el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas, entre otras (Alloway, 2013).

Particularmente, el plomo (Pb) es uno de los contaminantes que se ha incrementado en la corteza terrestre y en los cuerpos de agua debido a su amplio uso en la industria metalúrgica, en la fabricación de tintes y pinturas, así como de baterías. Los problemas ecológicos asociados a este metal como la bioacumulación y la biomagnificación han causado que sea catalogado como uno de los elementos más perjudiciales en el ambiente y para la salud humana (Zhang *et al.*, 2015).

Debido al peligro que conlleva la presencia de este metal y otros de su clase, se ha iniciado la búsqueda de indicadores que ayuden a detectar la presencia de contaminantes y su efecto en los seres vivos, siendo los bioindicadores uno de los más efectivos, ya que muestran alteraciones en su ciclo de vida y brindan información sobre los riesgos para otros componentes de los ecosistemas (Parmar *et al.*, 2016).

Vicia faba L. (Fabaceae), ha sido una de las plantas vasculares mayormente empleadas como bioindicador en ambientes contaminados por metales pesados, debido a que presenta características idóneas en la observación de daños genotóxicos y citotóxicos (Shahid *et al.*, 2011). El bioensayo con *V. faba* ha sido usado en estudios de daños en el DNA, aberraciones cromosómicas y nucleares inducidas por compuestos metálicos entre otros contaminantes. Las características que hacen a esta especie un buen bioensayo es que es económico, tiene una tasa de división celular rápida, sus cromosomas son de gran tamaño y fácilmente observables (Iqbal, 2016). No obstante, para este tipo de pruebas se han utilizado, en algunas investigaciones poblaciones silvestres y domesticadas, de manera indistinta, sin considerar el efecto que tiene el proceso de domesticación en la reducción de la variabilidad genética y en la resistencia al estrés abiótico, por lo que los resultados obtenidos puede provocar sesgos en la información de sus respuestas producidas por los contaminantes y en su papel como bioindicador.

Ante esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto genotóxico y citotóxico del plomo en células meristemáticas de raíz de semillas de *V. faba* silvestre y de la variedad Major (domesticada), a través de la presencia de micronúcleos y la determinación del índice mitótico, con la finalidad de conocer sus respuestas ante este metal y su relación con la domesticación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La realización de esta investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Morfofisiología Vegetal perteneciente al Centro de

Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (CIB-UAEH).

Material vegetal. Se utilizaron semillas certificadas de *Vicia faba* var. *Major* y semillas silvestres originarias de Acaxochitlán, Hidalgo; las semillas se mantuvieron sumergidas en agua destilada durante 24 horas, en condiciones de oscuridad y a temperatura ambiente. Para la germinación del material, las semillas se colocaron entre dos capas de algodón humedecido con agua destilada en cajas de petri, a temperatura ambiente y en oscuridad hasta la obtención de radículas de una longitud aproximada de 4 cm (Suárez y Melgarejo, 2010).

Diseño experimental. En los bioensayos se utilizó acetato de plomo II ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Reasol); se prepararon soluciones en tres concentraciones: Control (0 g L^{-1}), 0.005 g L^{-1} (T1), 0.01 g L^{-1} (T2) y 0.02 g L^{-1} (T3) a las que fueron expuestas ambos tipos de semillas.

La evaluación del daño genotóxico y citotóxico se realizó mediante la obtención de la frecuencia de micronúcleos (MN) e índice mitótico (IM), respectivamente con la técnica de Prieto-García *et al.* (2006) con modificaciones. Para ello, las radículas se sumergieron durante 24 horas con los tratamientos ya mencionados y al final se lavaron con agua destilada. Las radículas cortaron de 2 a 5 mm desde el ápice, e tejido obtenido se expuso a una solución de colchicina al 0.5% durante tres horas y posteriormente, se pasaron a una solución de etanol-ácido acético (3:1) durante 24 horas. Al término del periodo, el tejido se colocó en una solución de etanol al 70% durante 15 minutos, y finalmente en una solución de ácido clorhídrico 5 N durante 30 minutos en agitación constante. Para la tinción se utilizó aceto-orceína durante 25 minutos y el

montaje de las preparaciones histológicas se llevó a cabo mediante la técnica de aplastamiento en monocapa o “squash”; se realizaron 3 repeticiones del experimento.

La observación fue realizada en un microscopio óptico Lieder, en los aumentos de 40 y 100x, contando 1000 células en interfase en campos al azar; se realizó el conteo de micronúcleos, así como de las diferentes fases celulares como profase, metafase, anafase y telofase. Para la obtención de la frecuencia de micronúcleos se obtuvo el número promedio y se expresó en por cada mil (‰); mientras que el índice mitótico se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$IM = \frac{NCD}{NTCO} \times 100$$

Dónde:

IM= Índice mitótico

NCD: Número de células en división.

NTCO: Número total de células observadas.

Análisis estadísticos. Con los datos obtenidos se realizó la prueba de Chi² para corroborar la normalidad de los mismos. Para la comparación entre los tratamientos y las variedades se realizó

un análisis de varianza (ANOVA) mediante el uso del software Past versión 3.24. La significancia estadística se consideró cuando $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Daño genotóxico. El acetato de plomo, en las tres concentraciones evaluadas, indujo la formación de micronúcleos en las células meristemáticas de raíz en ambas variedades de *V. faba* (Figura 1), pero en todas ellas la var. *Major* presentó mayor frecuencia de MN.

El análisis estadístico muestra diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de semillas en las concentraciones de 0.01 y 0.02 g L⁻¹; asimismo, en la respuesta se observa una correlación positiva dependiente de la concentración del metal, ya que en el tratamiento con 0.02 g L⁻¹ se observó la frecuencia más alta de micronúcleos con 34 y 55 por cada mil células observadas, en la semilla silvestre y en la var. *Major*, respectivamente.

Los resultados indican que las semillas silvestres tuvieron una menor sensibilidad a los efectos del plomo, con un 41% menos de presencia de MN en promedio, comparada con la var. *Major* en las concentraciones más altas evaluadas (Gráfica 1).

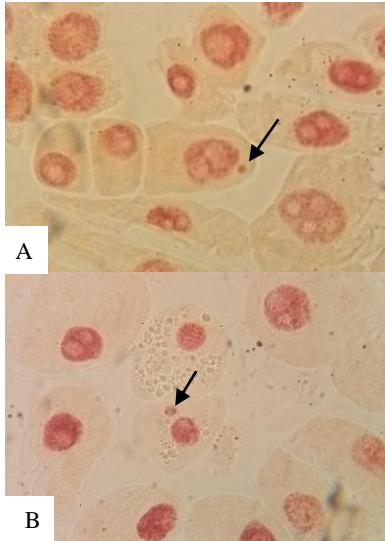
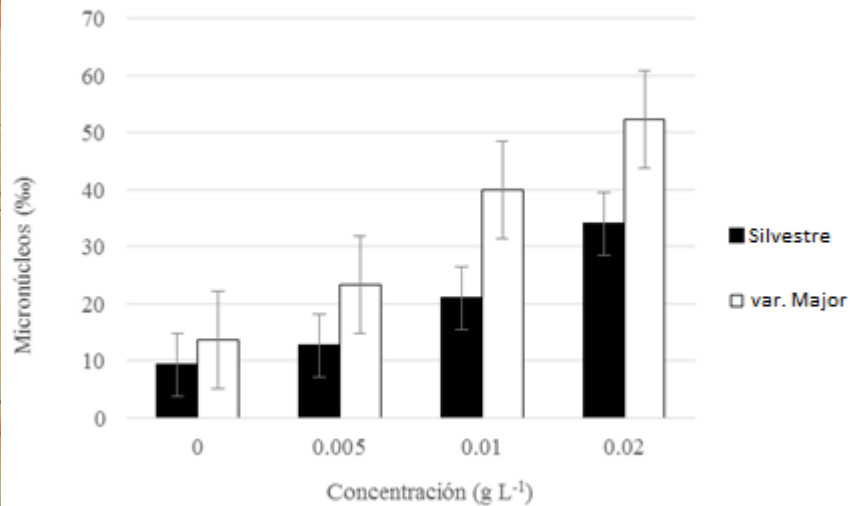


Figura 1. Presencia de micronúcleos en células del meristemo radicular en *V. faba silvestre* (A) y var. Major (B) observadas a 100x.



Gráfica 1. Frecuencia de micronúcleos en meristemos radiculares en silvestres y domesticadas de *V. faba*, expuestas a diferentes concentraciones de acetato de plomo (0, 0.005, 0.01, y 0.02 g L⁻¹). Cada valor representa el promedio y el error estándar para cada tratamiento.

Los resultados muestran que el plomo tiene un alto efecto genotóxico al inducir la formación de micronúcleos, lo cual concuerda con otros trabajos realizados con este metal pesado en meristemos radiculares, en uno de ellos se observó una alta incidencia de micronúcleos en células de *V. faba* a concentraciones menores a 200 μ M de nitrato de plomo (Arya *et al.*, 2013). En la investigación de Pourrut *et al.* (2011), realizada también en haba, se observa una correlación positiva entre la concentración del reactivo y la frecuencia de micronúcleos, pero en un intervalo de concentraciones de 0–20 μ M de nitrato de plomo; en ambos casos se utilizaron semillas certificadas (domesticadas) de haba. Estos resultados concuerdan con lo obtenido en esta investigación con la var. Major.

La alta incidencia de micronúcleos asociada a la presencia de plomo, sugiere que este tiene un efecto en los procesos de división del material genético durante el ciclo celular. A pesar de que

no se conoce con claridad el mecanismo molecular que provoca dichos errores en el DNA, uno de los más aceptados es el efecto asociado al estrés oxidativo que se genera en la células por el incremento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) al interactuar con los iones de este metal (Wang *et al.*, 2008).

Los iones de plomo tienen un fuerte efecto en la maquinaria enzimática que participa en la correcta división de los cromosomas durante el ciclo celular, afectando el conjunto de microtúbulos del huso acromático, lo que genera rupturas del material genético y la formación de masas de cromatina cercanas al núcleo, implicando una pérdida de información genética (Shahid *et al.*, 2011).

Efecto citotóxico. Los meristemos radiculares expuestos a los tratamientos con el metal pesado en ambos tipos de semillas mostraron una reducción significativa en la división celular, siendo el tratamiento con mayor

concentración (0.02 g L⁻¹) el que presentó el índice mitótico más bajo (Tabla 1). Al comparar ambas variedades, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$); sin embargo, la var. *Major* mostró una reducción en el índice mitótico en las concentraciones 0.01 y 0.02 g L⁻¹ del reactivo, en contraste con la otra variedad. En el caso del tratamiento T2 (0.005 g L⁻¹), el material proveniente de la semillas silvestres presentó un ligero incremento en el IM, lo cual puede deberse a un efecto hormético.

La reducción en el índice mitótico por la presencia de plomo observada en este estudio, concuerda con otras investigaciones realizadas con *Vigna mungo* var. HD-94, en el que se observó una disminución del IM en un intervalo de concentraciones de 25 a 125 ppm de acetato de plomo (Siddiqui, 2012); por otro lado, en una investigación con *Lactuca sativa* se observó un efecto mitotóxico, una reducción en la división celular inducido por nitrato de plomo con concentraciones menores a las del presente estudio (0.05 a 0.5 mg L⁻¹) (Silva *et al.*, 2017).

De acuerdo con Patra (2004), el índice mitótico,

que se basa en la proliferación

Tabla 1. Índice mitótico del meristemo

| Tratamiento | Concentración (g L ⁻¹) | Índice mitótico ($\mu \pm DS$) | |
|-------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | <i>V. faba</i> silvestre | <i>V. faba</i> var. <i>Major</i> |
| Control | 0 | 8.75 \pm 1.02 | 8.73 \pm 0.55 |
| T1 | 0.005 | 5.75 \pm 0.27 | 5.78 \pm 0.14 |
| T2 | 0.01 | 6.19 \pm 0.15 | 5.18 \pm 0.10 |
| T3 | 0.02 | 5.48 \pm 0.09 | 4.94 \pm 0.24 |

radicular en semillas silvestres y domesticadas de *V. faba* sometidas a tres concentraciones de acetato de plomo.

ción celular de un tejido, es un buen bioensayo que permite conocer la frecuencia de células que entran en división; permitiendo determinar alteraciones en este proceso derivado de la presencia de agentes extraños y tóxicos como lo son los metales pesados.

En el caso del estrés inducido por plomo, la disminución en la división celular puede deberse a distintos factores asociados a la interacción con los iones Pb²⁺, entre los que se encuentra un incremento en la rigidez de estructuras como la membrana y pared celular generada por la unión de sus componentes con los iones del metal, reduciendo considerablemente la mitosis. Otro de los factores es el retraso generalizado del ciclo celular por alteraciones en ciertas fases como el alargamiento de la interfase y la reducción de la fase M, debido probablemente a la interacción directa del plomo con las ciclinas, o bien de manera indirecta, por cambios en las concentraciones del glutatión (GHS), lo cual influye en la actividad de dichas proteínas reguladoras (Pourrut *et al.*, 2011).

Por otra parte, el leve incremento del índice mitótico observado en el tratamiento con la concentración de 0.01 g L^{-1} en el material silvestre, sugiere que el plomo puede generar un efecto hormético, ya que como lo menciona Poschenrieder *et al.* (2013), la hormesis es un procesos en el cual una dosis baja o subletal de un agente o estímulo estresante es capaz de activar una respuesta adaptativa que incrementa la resistencia de una célula u organismo frente a un estrés mucho más severo y muchas veces letal (López-Diazguerrero *et al.*, 2013). En un trabajo desarrollado también en *V. faba* se observó una estimulación en el crecimiento del sistema radicular de las plántulas a bajas concentraciones de plomo (Wang *et al.*, 2010).

Comparación entre las variedades y su relación con la domesticación. Los resultados obtenidos en este estudio permiten demostrar que las variedades de *V. faba* expuestas a acetato de plomo mostraron un efecto diferencial entre ellas, la var. *Major* (domesticada) fue más sensible a la exposición de este metal, promoviendo una alta frecuencia de micronúcleos y una reducción en el IM, mientras que la población silvestre exhibió una mayor tolerancia al estrés inducido. La variación en la sensibilidad observada en las semillas usadas en el presente trabajo puede ser resultado del proceso de domesticación que han sufrido, ya que la elección de características específicas a través de la selección artificial para la mejora de atributos o para sus condiciones de manejo, tiene como efecto indirecto la pérdida de la variación genética. Esto se agrava por ser un proceso evolutivo continuo, generando divergencias en las características morfológicas, fisiológicas, fenológicas, entre otras, que implican una pérdida gradual de la adaptación natural a diferentes tipos de estreses bióticos y abióticos,

lo cual reduce la adecuación de las especies o de sus variedades, teniendo afectaciones en la sobrevivencia y/o en la capacidad reproductiva (Smýkal *et al.*, 2018).

En este caso, las variedades utilizadas presentan un diferente grado de domesticación visible en los atributos de sus semillas, las de la var. *Major* son más grandes y pesadas, indicando que en el proceso de domesticación estas características han sido seleccionadas y apreciadas por el sector agrícola y comercial, con lo que se ha perdido información genética que le permite responder a los factores ambientales.

Por otro lado, la población silvestre presenta un menor grado de domesticación, la semilla es pequeña y con menor peso; Zhang *et al.* (2017) indican que las semillas silvestres al tener un nulo o bajo grado de domesticación, presentan una mayor diversidad genética, lo que les permite soportar y responder a diferentes tipos de estrés.

Con base en los resultados, se sugiere que *V. faba* var. *Major* debe utilizarse preferencialmente como bioindicador de contaminación por plomo, ya que presenta una mayor sensibilidad a los contaminantes. Asimismo, esta variedad cumple con otros atributos recomendados para los bioindicadores vegetales, tales como un tiempo de respuesta corto al efecto de los contaminantes, una gran variedad de bioensayos que pueden realizarse en sus tejidos o en todo el individuo, ligados a los componentes de la adecuación; sencilla identificación, así como por ser una variedad de fácil obtención, manipulación y cultivo (Fontanetti *et al.*, 2010).

El presente trabajo de investigación permite contribuir al conocimiento de *V. faba*

como especie bioindicadora de plomo, particularmente revelando el daño genotóxico y citotóxico que genera el acetato de plomo. Asimismo, los resultados diferenciales del daño que causa este metal entre las variedades, permiten sugerir el uso de *V. faba* var. *Major* como bioindicador al mostrar una alta sensibilidad, lo cual puede ser aprovechado por futuras investigaciones que busquen complementar la información acerca de la sensibilidad a otros metales pesados o sustancias contaminantes de importancia ambiental.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El acetato de plomo, en las tres concentraciones evaluadas, indujo la formación de micronúcleos en las células meristemáticas de raíz en ambas variedades de *V. faba* (silvestres y domesticadas) lo que demuestra su alto efecto genotóxico, sin embargo, *Vicia faba* var. *Major* tuvo mayor frecuencia de MN.

Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de semillas en las concentraciones de 0.01 y 0.02 g L⁻¹ y se observó una correlación positiva dependiente de la concentración del metal.

En el tratamiento con 0.02 g L⁻¹, la frecuencia más alta de micronúcleos fue de 34 y 55 por cada mil células, en la semilla silvestre y en la var. *Major*, respectivamente. Las semillas silvestres tuvieron una menor sensibilidad a los efectos del plomo, con un 41% menos de presencia de MN en promedio, comparada con la var. *Major* en las concentraciones más altas evaluadas.

Los meristemos radiculares expuestos a los tratamientos con el metal pesado en ambos tipos de semillas mostraron una reducción

significativa en la división celular, siendo el tratamiento con mayor concentración (0.02 g L⁻¹) el que presentó el índice mitótico más bajo. La var. *Major* mostró una reducción en el índice mitótico en las concentraciones con 0.01 y 0.02 g L⁻¹ de reactivo, en contraste con *Vicia faba* (silvestre). En el caso del tratamiento T2 (0.005 g L⁻¹), el material proveniente de la semillas silvestre presentó un ligero incremento en el IM, lo cual puede deberse a un efecto hormético.

Para los bioensayos se sugiere que se tenga especial cuidado en el uso de semillas domesticadas o certificadas para garantizar su respuesta como bioindicadores de contaminantes.

LITERATURA CITADA

- Alloway, B. J. (2013) Sources of heavy metals and metalloids in soils. En: Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Alloway B. J. (ed). Springer Netherlands. Berlín, Alemania. pp: 11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Arya, S. K., A. Basu y A. Mukherjee (2013) Lead induced genotoxicity and cytotoxicity in root cells of *Allium cepa* and *Vicia faba*. Nucleus 56:183-189. <https://doi.org/10.1007/s13237-013-0099-z>
- Fontanetti, C. S., L. R. Nogarol, R. B. de Souza, D. G. Perez y G. T. Mazivero (2010) Invertebrates of the edaphic fauna and higher plants as soil bioindicators. En: Bioindicators and Biomarkers in the assessment of soil toxicity. Fontanetti C. M. y L. R. Nogarol (eds.). São Paulo State

- University. Rio Claro, Brasil. pp: 147-151.
- Iqbal, M. (2016). *Vicia faba* bioassay for environmental toxicity monitoring: a review. *Chemosphere*, 144: 785-802. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.048>
- Khan, A., S. Khan, M. A. Khan, Z. Qamar y M. Waqas (2015) The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22:13772–13799. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4881-0>
- López-Diazguerrero N.E., González V.Y.P., Hernández-Bautista R.J., Alarcón-Aguilar A., Luna-López A., Königsberg M.F. (2013). Hormesis: lo que no mata, fortalece. *Gaceta Médica de México*, 149: 438-447.
- Nagajyoti, P. C., K. D. Lee y T. V. Sreekanth (2010) Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters* 8:199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- Parmar, T. K., D. Rawtani y K. Agrawal (2016) Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science* 9:110-118. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1162753>
- Patra, M., N. Bhowmik y A. Sharma (2004) Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany* 2:199-223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.02.009>
- Poschenrieder, C., C. Cabot, S. Martos, B. Gallego y J. Barceló (2013) Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science* 212:15-25. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.07.012>
- Pourrut, B., S. Jean, J. Silvestre y E. Pinelli (2011b) Lead-induced DNA damage in *Vicia faba* root cells: Potential involvement of oxidative stress. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 726:123-128. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2011.09.001>
- Prieto-Méndez, J., C. A González-Ramírez, A. D. Román-Gutiérrez, A. D. y F. Prieto-García (2009) Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 29-44.
- Prieto-García, F., M. Á. Lechuga-Vargas, M. A. Méndez-Marzo, E. Barrado-Esteban y J. C. Gaytan-Oyarzún (2006) Daños tóxicos en tejidos vegetales, producidos por aguas contaminadas con arsénico en Zimapán, Hidalgo, México. *Food Science and Technology* 26:94-97. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000100016>
- Shahid, M., E. Pinelli, B. Pourrut, J. Silvestre y C. Dumat (2011) Lead-induced genotoxicity to *Vicia faba* L. roots in relation with metal cell uptake and

- initial speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74:78-84. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.037>
- Siddiqui, S. (2012) Lead induced genotoxicity in *Vigna mungo* var. HD-94. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 11:107–112. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2012.01.01>
- Silva, S., P. Silva, H. Oliveira, I. Gaivão, M. Matos, O. Pinto-Carnide y C. Santos (2017) Pb low doses induced genotoxicity in *Lactuca sativa* plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 112:109-116. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.026>
- Smýkal, P., M. N. Nelson, J. D. Berger y E. J. B. von Wettberg (2018). The impact of genetic changes during crop domestication. *Agronomy* 8:119. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070119>
- Suárez, D. y L. M. Melgarejo (2010) Biología y germinación de las semillas. En: Experimentos en fisiología vegetal. Melgarejo M. L. (ed.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 13-24.
- Wang, C. R., Y. Tian, X. R., Wang, H. Yu, X. W. Lu, C. Wang y H. Wang (2010) Hormesis effects and implicative application in assessment of lead-contaminated soils in roots of *Vicia faba* seedlings. *Chemosphere* 80:965-971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.049>
- Wang, C. R., X. R Wang, Y. Tian, H. X. Yu, X. Y. Gu, W. C. Du y H. Zhou (2008) Oxidative stress, defense response, and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27:970-977. <https://doi.org/10.1897/07-344.1>
- Zhang, H., N. Mittal, L. J. Leamy, O. Barazani y B. H. Song (2017). Back into the wild—Apply untapped genetic diversity of wild relatives for crop improvement. *Evolutionary applications* 10:5-24. <https://doi.org/10.1111/eva.12434>
- Zhang, R., V. L. Wilson, A. Hou y G. Meng (2015) Source of lead pollution, its influence on public health and the countermeasures. *International Journal of Health and Animal Science Food Safety* 2:18-31.

Copyright (c) 2020 A. S. J. Garnica Acuña, Maritza López Herrera, L. Romero Bautista y M. Meza Sánchez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)