

Estrés inducido por plomo en el crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. variedades canario y panamito

Stress induced by lead in the growth of *Phaseolus vulgaris* L. canary and panamite varieties

Recibido: enero 05 de 2020 | Revisado: febrero 15 de 2020 | Aceptado: marzo 02 de 2020

JULIO CHICO RUÍZ¹
LISI CERNA REBAZA²
LUIS FELIPE GONZALES LLONTOPO³
MANUEL RODRÍGUEZ LACHERRE⁴

RESUMEN

Son pocas las especies de plantas adaptadas para sobrevivir en suelos contaminados con altas concentraciones de metales sin alterar su fisiología y crecimiento. Para realizar los experimentos acerca de resistencia a metales pesados se selecciona especies vegetales con un ciclo biológico relativamente corto y capaz de dar a conocer los efectos del plomo que causan estrés en el crecimiento de la planta. Con estos antecedentes se evaluó el estrés inducido por plomo en el crecimiento de *Phaseolus vulgaris* var. canario y var. panamito. El diseño experimental consistió en bloques completamente al azar con tres concentraciones de 0, 25 y 50 ppm de PbSO₄ con tres repeticiones cada uno. Las plántulas se adaptaron a un sistema hidropónico, el cual contenía el medio nutritivo de Hoagland modificado y las diferentes concentraciones de plomo. Los resultados muestran que la variedad del canario es la menos afectada por estrés al plomo, por eso tiene un mejor crecimiento de la raíz la cual se relaciona con su peso seco y su índice de producción relativa (RP); además presenta un alto índice de translocación (48.50% a 25 ppm) con bajo coeficiente de extracción (0.407 a 50 ppm). Se concluye que ambas variedades presentan diferentes comportamientos frente al estrés por plomo.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, plomo, estrés abiótico

ABSTRACT

There are few plant species adapted to survive in soils contaminated with high concentrations of metals without altering their physiology and growth. To carry out the experiments on resistance to heavy metals, plant species with a relatively short biological cycle and capable of publicizing the effects of lead that cause stress on plant growth is selected. For this reason, lead induced stress was evaluated in the growth of *Phaseolus vulgaris* var. canary and var. panama. The experimental design consisted of completely randomized blocks with three concentrations (50, 25 and 0 ppm of PbSO₄ and three replications). The seedlings were adapted to a hydroponic system, which contained the nutrient medium of Hoagland and the different concentrations of

- 1 Laboratorio de Cultivos Celulares. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo-Perú. jchico@unitru.edu.pe
- 2 Laboratorio de Biología. American School- Trujillo-Perú.
- 3 Facultad de Educación y Ciencias de la Comunicación, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (UNTRM). Chachapoyas-Perú luisfego@hotmail.com
- 4 Laboratorio de Fitopatología. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo-Perú. rola_rob10@hotmail.com

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2020.v25n29.02>

lead. results show that the Canary variety is the least affected by lead stress, so it has a better growth of the root which is related to its dry weight and relative production index (RP), also has a high rate of translocation (48.50% at 25 ppm) but low extraction coefficient (0.407 to 50 ppm) It is concluded that both varieties have different behaviors against lead.

Key words: f *Phaseolus vulgaris* L., lead, abiotic stress

Introducción

El desarrollo industrial y crecimiento de las poblaciones han generado serios problemas de contaminación por metales pesados, provocando un incremento de su concentración en el ambiente y su migración a suelos no contaminados, que deterioran la calidad del suelo, del aire y del agua. La presencia de estos metales pesados ha sido asociada a actividades industriales, mineras, fundiciones, o suelos naturalmente ricos en metales debido a afloramientos minerales (Kachenko, 2007) además de refinerías, aguas residuales, procesos nucleares y manufacturas de gran variedad de productos (Paim et al., 2006; Reyes et al., 2016).

La toxicidad que los metales puedan presentar en el suelo no solo dependerá de su concentración total, sino también del grado de movilidad relativa de los elementos traza en suelos, el cual es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea (Sierra, 2006), debido a factores como el tipo de arcilla, pH, capacidad de intercambio de cationes, contenido de materia orgánica, los complejos fenómenos de adsorción / desorción, precipitación/disolución, y reacciones redox. (Carvalho et al., 2008).

Los metales pesados o elementos traza, generalmente, presentan una densidad atómica que supera los 5 a 6 g cm⁻³, también se considera metal pesado si su número atómico es superior a 20.5 (Reigosa et al., 2004). Dentro de estos metales encontramos al plomo (Pb) sin valor fisiológico conocido, pero si uno de los mayores contaminantes del ambiente y altamente tóxico para el hombre, (Prieto, 2009; Chibuike & Obiora, 2014; Reyes et al., 2016).

La capacidad de una especie para tolerar, eficientemente, altas concentraciones de Pb dentro de sus células y tejidos, son llamadas hiperacumuladoras ya que tienen la habilidad de solubilizar metales del suelo, absorbiéndolos en sus raíces y translocándolos hasta sus brotes. (Vidal, 2009). Pb en altas concentraciones inhibe la germinación de semillas, y en algunos casos el crecimiento y desarrollo, además de alterar muchos procesos bioquímicos y fisiológicos. Por ejemplo, su presencia daña las membranas de las células, reduce la transpiración, impide la síntesis de proteínas, daña e inhibe la fotosíntesis y afecta la actividad de varias enzimas y el transporte mitocondrial de los electrones (Clemens & Ma, 2016; Salas, 2007; Yildiz et al., 2009).

En estudios en variedades de “rabanito” se encontró una concentración de Pb

significativamente mayor en las partes aéreas en comparación a las raíces (Rengel & Zhang, 2003). Reportes utilizando girasol mostraron que la longitud de la raíz no se ve afectada y la mayor concentración de este metal se presenta en las raíces. Además, que la planta es capaz de tolerar concentraciones de 500 mg/l de Pb (Chico *et al.*, 2012). Trabajos en frijol mostraron la translocación de cantidades incrementadas de Pb y su efecto en la productividad. En una concentración de 1.0 mgL⁻¹ se presentó una translocación del 5.7% del metal hacia las hojas, a la concentración de 10 mg L⁻¹ el Pb generó una reducción en la producción de materia seca de las raíces y los tallos en 83% y 76% respectivamente (Cannata *et al.*, 2015). Otro efecto fue la disminución de la producción de granos, pero en menor proporción comparada con otros metales ensayados, según lo reportado por Carvalho y colaboradores el 2008. También fue observada alteración en el crecimiento según un estudio de Isaza (2013). *Phaseolus vulgaris* “frijol” representa la fuente más importante de proteínas en Latinoamérica y África donde son producidas y consumidas en grandes volúmenes. Es un cultivo muy apreciado por sus semillas que son de consumo popular; además la planta es muy sensible a las condiciones medio ambientales adversas, por lo que su cultivo se limita a ciertas áreas que llevan los requisitos de clima y suelos nutritivos que exige la planta (Armando *et al.*, 2011). Sus características de tallo corto (menos de un metro), raíces fibrosas, grandes y gruesas, y de ciclo biológico corto (tres meses aproximadamente) permiten desarrollar experiencias en el laboratorio, pues la respuesta fisiológica a una situación estresante es rápida. Por ello, frecuentemente, es seleccionada como planta modelo (Marcele *et al.*, 2015).

Es necesario conocer la eficiencia de cada especie para acumular metales en sus tejidos y su resistencia a diferentes concentraciones de contaminantes; así como, las condiciones necesarias para el cultivo y desarrollo de las especies de plantas. Por lo expuesto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el estrés inducido por Pb en el crecimiento de *P. vulgaris* var. canario y var. panamito.

Método

1. Material biológico

La semilla de *P. vulgaris* fue adquirida en la Estación Experimental de Vista Florida-INIA, Chiclayo. Se consiguió una cantidad aproximada de 1 kilo por cada variedad.

2. Cultivo de plántulas y adaptación al sistema hidropónico

La experiencia se realizó en condiciones de laboratorio. Inicialmente se ejecutó el proceso de germinación de las semillas (previa desinfección con lejía al 2%) en placas Petri (50 semillas por placa). A los cinco días de germinación de las plántulas, fueron seleccionadas aquellas que poseían raíces con una longitud no menor a 5 cm. Posteriormente, fueron adaptadas al sistema hidropónico, el cual consistió en recipientes de plástico con cuatro (4) litros de agua destilada que contenían el medio nutritivo de Hoagland & Arnon (1950) modificada. Todo este sistema se mantuvo aireado con bombas de acuario, con un ajuste de pH en 6.5, provista de una fuente luminosa con un fotoperiodo de 16:8 y temperatura promedio de 23° C. Figura 1.



Figura. 1. Unidades experimentales de *P. vulgaris* L. de la variedad canario, expuestas a diferentes concentraciones de Pb. Testigo, T0, (izquierda), T1 (25 ppm Pb, al centro) y T2 (50 ppm Pb, derecha).

3. Tratamiento con sulfato de Pb (II) ($PbSO_4$)

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres tratamientos por triplicado por cada variedad. Cada unidad experimental presenta 10 plántulas dando un total de 90 plántulas por tratamiento.

Como fuente de Pb se utilizó $PbSO_4$ en concentraciones de $[0\mu M]$, $[25\mu M]$ y $[50\mu M]$. Pasados diez (10) días de adaptación al sistema hidropónico, las plántulas se conservaron en los tratamientos respectivos por un periodo de tres días.

4. Evaluación de las plántulas

4.1. Determinación de la biomasa de hojas y raíz

En una balanza analítica, se determinó el peso fresco de hojas y raíz de 10 plantas, posteriormente fueron colocadas en una estufa por 24 horas a

$65^\circ C$ y determinar el peso seco de ambos órganos vegetales.

4.2 Evaluación del crecimiento de la longitud de raíz

Se tomó la medida de la raíz más larga utilizando una regla milimetrada en cada una de las muestras.

4.3 Determinación del contenido de Pb

Se analizaron las muestras secas de hojas y raíces expuestas a diferentes concentraciones de los metales en el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Trujillo. Para la lectura del Pb fue utilizado un espectrofotómetro de absorción atómica Analyst 300 Perkin Elmer.

4.4 Determinación de la enzima peroxidasa (Arellano et al., 2013)

4.4.1 Obtención del extracto crudo de peroxidasa

Las raíces fueron lavadas con agua destilada cuatro veces para eliminar impurezas y posteriormente se refrigeraron por 24 h y T =13°C. Consecutivamente fue triturado con un mortero obteniéndose un extracto crudo, el cual fue filtrado tres veces en papel de filtro Whatman No 1. Posteriormente, esta solución filtrada fue almacenada a una temperatura de 8° C.

4.4.2 Medición de la actividad de la peroxidasa

El extracto crudo se acondicionó con buffer fosfato 0.1M de pH 7.0, para luego realizar las mediciones de absorbancia en un espectrofotómetro Termocientific evolution 300 UV-Vis a una longitud de onda de 470 nm; los sustratos utilizados fueron guayacol 16 mM y peróxido de hidrógeno

(H₂O₂) 8 mM. Se agregaron 25 µL de extracto crudo a una cubeta de cuarzo conteniendo los sustratos 0.5ml de guayacol 16mM y 0.5ml de peróxido de hidrógeno 8 mM ambos diluidos en buffer fosfato 0.1M de pH 6.8.

4.5 Coeficiente de extracción (factor de transferencia)

El potencial de las plantas para captar el Pb de la solución nutritiva fue medido con el coeficiente de fitoextracción o factor de transferencia (t) (Henry 2000), para ello se utilizó la siguiente relación:

$$t = \frac{\text{total de metal en la planta}}{\text{metal en solución}}$$

4.6 Índice de producción relativa (RP): Se relaciona la influencia del metal en la variación del peso seco de la raíz (PSr + PSh) y es obtenida de la siguiente manera:

$$RP (\%) = \frac{\text{peso seco producido según concentración del metal}}{\text{peso seco producido con el metal ausente}} \times 100$$

4.7. Índice de translocación (TI): Es la capacidad de las especies para translocar el Pb de la raíz hacia las hojas (Paiva et al., 2002)

$$TI = \frac{\text{Parte aérea}}{\text{Parte aérea} + \text{Parte raíz}} \times 100$$

4.8. Alteraciones morfológicas (análisis cualitativo): Al finalizar la experiencia se registró el

aspecto que presentaban las raíces según la concentración estresante (cualitativa).

4.9. Análisis estadísticos

Se utilizó el programa IBM *Statistical Package for the Social Science* (SPSS) v. 22. para aplicar promedio, desviación estándar y ANOVA con p <0.05.

Resultados

Tabla 1

Crecimiento en longitud (cm) de la raíz en *P. vulgaris* var. canario y var. panamito al ser expuestas a diferentes concentraciones de Pb por 72 horas. Son mostrados los promedios y desviación estándar de los ensayos realizados por triplicado.

Tratamientos Variedad	T1 0	T2 25	D	%	T3 50	D	%
Canario	1.4±0.86*	1.58±1.04*	0.18	12.85	1.75±0.56*	0.35	25.00
Panamito	0.66±0.37**	0.70±0.78**	0.04	6.06	0.78±0.73**	0.12	18.18

Tratamientos de [Pb] en ppm,

D: diferencia de T (tratamientos) con el testigo T1

*Existe diferencia significativa $p < 0.05$

**No existe diferencia significativa $p < 0.05$

En la Tabla 1 se presenta el crecimiento de las raíces de *P. vulgaris* las cuales no se ven afectadas pues su longitud es mayor cuanto mayor es la concentración. El

mayor porcentaje de crecimiento se presenta en la variedad canario 12.85 % y para 25 ppm y 25% para 50 ppm.

Tabla 2

Peso fresco (g.) en las hojas y raíces de *P. vulgaris* var. canario y panamito al ser expuestas a diferentes concentraciones de Pb a las 72 horas. Los resultados son promedios y desviación estándar de tres repeticiones

Tratamiento* Variedad	Órgano	T1 0	T2 25	D	%	T3 50	D	%
Canario	Hojas	14.53±5.97	14.06±2.17	-0.47	3.23	13,13±2.93	-1.4	9.63
Panamito	Hojas	7.73±2.48	5.53±1.48	-2.2	28.46	5.49±0.49	-2.24	28.97
Canario	Raíz	13.46±1.40	13.03±1.89	-0.43	3.19	12.83±2.44	-0.63	4.68
Panamito	Raíz	5.05±0.26	3.87±0.30	-1.18	23.36	3.72±0.43	-1.33	26.33

*Tratamiento de [Pb] en ppm

Cuando se evalúa el peso fresco observamos que este va disminuyendo según aumente la concentración de Pb como se observa en la Tabla 2, muy al

contrario, lo que sucede con la longitud de la raíz (Tabla 1). También la variedad más afectada sigue siendo el panamito.

Tabla 3

Índice de producción relativa (RP) y peso seco (g.) en las hojas y raíces de *P. vulgaris* var. canario y panamito al ser expuestas a diferentes concentraciones de Pb a las 72 horas. Los resultados son promedios y desviación estándar de tres repeticiones

Tratamiento Variedad	Órgano	T1 0	T2 25	RP %	T3 50	RP %
Canario	Hojas	5.96±1.09	6.13±0.81	102.85	6.33±0.12	106.20
Panamito	Hojas	2.73±0.09	2.66±0.09	97.43	2.43±0.04	89.01
Canario	Raíz	5.16±0.12	5.5±0.08	106.58	5.73±0.12	111.04
Panamito	Raíz	2.46±0.04	2.5±0.08	101.62	2.53±0.12	102.84

*Tratamiento de [Pb] en ppm

RP (%): índice de producción relativa

En la Tabla 3 observamos como el peso seco (PS) incrementa según sea mayor la concentración de Pb para la variedad canario en las hojas y en las raíces. Caso contrario, la variedad panamito, disminuye en las hojas, pero aumenta ligeramente en las raíces. El RP es mayor en las raíces que en las hojas para ambas variedades, salvo la raíz de panamito.

También se analizó la acumulación de plomo en los tejidos vegetales (Tabla 4) y este fue en aumento según como aumenta la concentración de Pb. La variedad panamito presenta la mayor concentración de plomo (1.098 mg Pb/g de vegetal) a 25 ppm y es menor a 50 ppm (0.536 mg Pb/g de vegetal).

El índice de translocación es mayor en la variedad canario (48.50%) a 25 ppm y en 50 ppm es mayor para la variedad panamito (29.93 %).

En la Tabla 5 se observa el comportamiento de la peroxidasa, la cual aumenta según aumenta la concentración de la sustancia estresante. Y por último el coeficiente de extracción es analizado en la Tabla 7. La variedad panamito capta la mayor cantidad de metal a 25 ppm casi cuatro veces en relación a la variedad canario (51.04 y 14.68 respectivamente); en cambio cuando están expuestas a 50 ppm solamente es el doble en relación a la variedad canario (0.765 y 0.407 respectivamente).

Tabla 4

Acumulación de Pb (mgpb/g de vegetal) e índice de translocación (TI) en hojas y raíz de P. vulgaris var. canario y var. panamito a las 72 horas. Los resultados son promedios y desviación estándar de tres repeticiones

Tratamiento Variedad	Organo	T1* 0	T2* 25	TI	T3* 50	TI
Canario	Hoja	0.015	0.178	48.50	0.190	46.68
	Raíz	0.015	0.189		0.217	
Panamito	Hoja	0.038	0.178	13.94	0.229	29.93
	Raíz	0.038	1.098		0.536	

Tratamiento de [Pb] en ppm

TI: índice de translocación (%)

*Existe diferencia significativa $p < 0.05$

Tabla 5

Unidades de enzima (peroxidasa) en raíces de la var. canario y panamito expuestas a diferentes concentraciones de Pb.

Tratamiento Variedad	0 UE	25 UE	50 UE
Canario	308.1 ±0.04	328.55±0.06	481, 1±0.04
Panamito	187.55 ±0.06	203.2±0.05	218.2±0.55

* [Pb] en ppm

Tabla 6

Coefficiente de extracción analizado en las variedades canario y panamito

Tratamiento	25		50	
Variedad	TP	t	t	TP
Canario	0.367	14.68	8.14	0.407
Panamito	1.276	51.04	15.3	0.765

TP: total de metal en la planta

t: coeficiente de extracción

Las alteraciones morfológicas frecuentes en las raíces se observan en la Figura 2. A los tres días, las raíces están flácidas (a), delgadas, pierden su color blanco

lentamente hasta tomar un color marrón a la vez que proliferan numerosas raíces secundarias (b) y en (c) se observa una raíz normal, turgente y de color blanco.

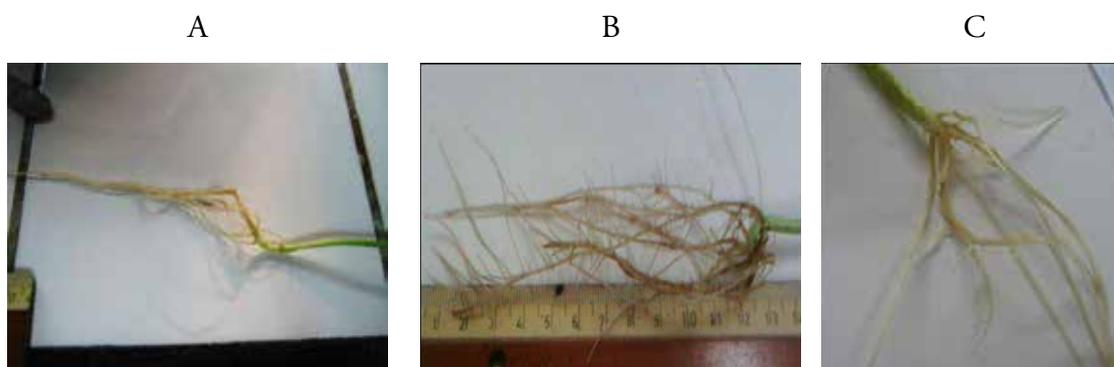


Figura 2. Alteraciones morfológicas producido en las raíces de *P. vulgaris* var. panamito cuando son expuestas a plomo (a) raíces flácidas (b) oscurecimiento y numerosas raíces secundarias. (c) raíz normal.

Discusión

Los resultados del estrés inducido por plomo muestran diferencias para cada una de las variedades estudiadas. Así sus raíces crecen mucho más que las del testigo (Tabla 1), esto sugiere que su crecimiento no se ve alterado; según Salas (2007), este órgano es sensible a los elementos tóxicos y el que se encarga de la absorción de los minerales, por lo tanto, debe presentar los primeros síntomas de toxicidad y eso se observa en la var. panamito al mostrar menor crecimiento y alteraciones en su morfología (Figura 2) o también puede inducir a un mayor crecimiento como en la var. canario.

Sin embargo, en esos tres días que las plántulas estuvieron expuestas al plomo el peso fresco disminuyó (Tabla 2), o sea la absorción de agua por las raíces ha ido disminuyendo, especialmente, en la var. panamito, lo cual se manifiesta en menos crecimiento y a la vez se observó que las hojas se van marchitando. Esto se explica porque la absorción de agua se da por las raíces, inducida por la transpiración, pero al estar alteradas no están translocando suficiente agua a la parte superior de la planta, en especial a las hojas como lo sostiene Sinclair (2018); y si lo comparamos con el peso seco (Tabla 3) este sí va aumentando. Según Kosokrubhov (2004) se debe a un incremento de la síntesis de polisacáridos de la pared celular.

La concentración de plomo en la parte aérea es el parámetro fisiológico más importante para evaluar el potencial de fitoextracción de plomo en las plantas (Tabla 4). La acumulación de plomo en raíces de la var. panamito es significativamente superior que, en la parte aérea, debido, posiblemente a la baja translocación de plomo desde las raíces hacia la parte aérea y debido a que las grandes partículas de Pb no pueden cruzar fácilmente la *banda de Caspari* por su tamaño y a sus cargas eléctricas. Del mismo modo en las hojas es baja la concentración de este metal debido al proceso de transpiración (Al-Qurainy, 2009).

Según DalCorso et al. (2013) existe un amplio rango de mecanismos de protección en las células vegetales que sirven para eliminar las especies reactivas del oxígeno (ROS). Entre estas tenemos los antioxidantes enzimáticos tales como catalasa, peroxidasas, superóxido dismutasa u otras. La inducción de la peroxidasa es una respuesta general de plantas superiores a la absorción de cantidades tóxicas de metales tales como: Cd, Cu, Pb, Zn y Ni que se manifiesta en las dos variedades de *P. vulgaris* L. en estudio pues se encontró un incremento en la UE según aumentaba la concentración del Pb (Tabla 5).

Al respecto Yamunarani (2004) reportó una relación de la actividad POD (peroxidasa) con la respuesta de defensa de la planta y con la resistencia a diferentes adaptaciones de estrés biótico y abiótico. Asimismo, García (2006) explica que la presencia del plomo induce la síntesis de peróxido de hidrógeno el cual provoca un desequilibrio del estado redox celular y la planta reacciona con la síntesis de peroxidasa, la enzima del estrés.

El índice de translocación (TI), y el índice de producción relativa (RP) son altos en la var. canario, pero tiene un bajo coeficiente de extracción (t) (Tabla 3,4,6). Con TI medimos la capacidad de translocar el plomo de la raíz a las hojas, el RP cuanto influye el metal en la formación de la materia seca y t cuánto capta del metal por las raíces. Entonces la var. canario transloca el metal a la parte superior de la planta a pesar de su baja t. Esto se explica por su particularidad de poseer un sistema muy específico de “bombear” metales desde los tejidos radicales hacia la parte aérea (factor de translocación).

Sin embargo, en algunas plantas el Pb es capaz de acumularse, principalmente, en las raíces siendo mínima su presencia en otras partes u órganos de los cultivos; esto, correspondería a que el transporte de plomo es predominante dentro del apoplasto de la raíz en una forma radial a través del córtex y se acumula cerca de la endodermis. El transporte limitado de plomo desde las raíces hacia otros órganos es debido a la barrera de la endodermis de la raíz. Tal y como muestra la mayoría de datos referidos a la elevada acumulación de Pb en raíces comparada con la de la parte aérea. Parece ser que la banda de Caspari de la endodermis es el mayor factor limitante que restringe el transporte de plomo dentro del cilindro central como lo afirma Rengel y Zhang (2003).

Carvalho et al. (2008) refiere que la baja translocación del Pb depende de su volumen en el suelo y que la baja translocación se debe a los quelatos formado entre el Pb y los aminoácidos o sustancias relacionadas a la raíz, esto lo corrobora el trabajo de Silva et al. (2007a, 2007b) sobre

la síntesis y caracterización de quelatos basados en Pb, Zn y Cu con DTPA (ácido dietilnetriaminopentacético) quien determinó la elevada estructura DTPA-Pb. Si es así esto dificulta que el metal ascienda. En las plantas encontramos complejos parciales de aminoácidos libres, proteínas o secreciones de las plantas, ricos en donadores de electrones, como DTPA, similar conducta química fue verificado por Paim et al. (2006) en suelo contaminado con Zn.

También se puede explicar el comportamiento del Pb debido a sus propiedades en la tabla periódica, particularmente por su radio atómico 1.81 pm y densidad 11.3 g /cm³, estos factores reflejan la movilidad y actividad del Pb (Marcele et al. 2015). Además de estas propiedades, Antoniadis et al. (2007) y Oliveira et al. (2009) también atribuyen la baja movilidad del Pb a su electronegatividad.

Conclusiones

Las variedades canario y panamito de *P. vulgaris* estudiadas tuvieron diferentes comportamientos cuando fueron sometidas a estrés por plomo, siendo la var. canario la que mostró tolerancia en relación a la var. panamito. Las respuestas a este estrés por plomo se manifestaron en una mayor longitud de la raíz (25% más a 50 ppm), la que menos agua perdió (4.68 % menos en peso fresco de la raíz a 50 ppm), la de mayor peso seco en la raíz (111.04% más a 50 ppm), la que acumuló menos plomo en sus raíces y hojas y además la que presentó los mayores contenidos de peroxidasa en sus raíces (481.1 UE). Con respecto al absorción del plomo, el coeficiente de extracción fue el más bajo (8.14), el índice de producción relativa fue el más alto (111.04% a 50 ppm), y el índice de translocación (48.50 a 25 ppm.), para la var. canario.

Referencias

- Al-Qurainy, F. (2009). Toxicity of Heavy Metals and Their Molecular Detection on *Phaseolus vulgaris* (L.). Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(3): 3025-3035
- Antoniadis, V., McKinley, J., Zuhairi, Y.W. (2007). Single-element and competitive mobility measured with column infiltration and batch tests. *Journal of Environmental Quality* 36: 53–60. DOI:10.2134/jeq2006.0134
- Arellano, B., Ilich, Z., Salazar, C., Rodríguez, H. (2013). Actividad enzimática y patrones electroforéticos de peroxidasa de raíces de *Brassica napus* y *Raphanus sativus* y frutos de *Sechium edule* y *Cucumis sativus*. *Rebiol* 33 (1): 1-10.
- Armando, J., Rosas, M.C., Ramírez, J.C., Ulloa, B.C. (2011). El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Revista Fuente* No. 8: 5-8
- Cannata, M.G., Bertoli, A.C., Carvalho, R., Augusto, A.S., Bastos, A.R., Freitas, M.P., Carvalho, J.G.

- (2015). Stress Induced by Heavy Metals Cd and Pb in Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Grown in Nutrient Solution. *Journal of Plant Nutrition*, 38:4, 497-508.
- Carvalho, A. V., Carvalho, R., Abreu, C; Furtini, A. (2008). Production of dry material and grains by bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated in soils treated with heavy metals]. *Química Nova* 31: 949–955.
- Chibuike, G.U. & Obiora, S.C. (2014). Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods. *Applied and Environmental Soil Science*: 1- 12
- Chico-Ruiz, J., Cerna-Rebaza, L., Rodríguez- Espejo, M., Guerrero-Padilla, M. (2012). Capacidad remediadora de la raíz de girasol, *Helianthus annuus*, cuando es sometida a diferentes concentraciones de plomo *Rebiol* 32(2): 13-19.
- Clemens, S. & Ma, J.F. (2016). Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. *Annu. Rev. Plant Biol.* 67:489–512
- DalCorso, G., Fasani, E., Furini, A. (2013). Recent advances in the analysis of metal hyperaccumulation and hypertolerance in plants using proteomics. *Frontiers in Plant Science* 4(280): 1-7.
- García, D. (2006). Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *zea mays*. L. expuestas a la toxicidad por plomo. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Barcelona. pp. 60
- Henry, J. R. (2000). An overview of the phytoremediation of lead and mercury. National Network of Environmental Management Studies (*NNEMS*). Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency.
- Isaza, G. (2013). Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. *Biología Vegetal* Vol. 13, No 3: 161-167
- Hoagland, D.R.& Arnon, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experimental Station* Vol. 347(2): 32
- Kachenko A. (2007). Heavy metal tolerance in common fern species. *Australian. J Botany* 2: 63-73.
- Kosobrukhov, A. (2004). *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soil: growth and photosynthesis. *Plant Grow Regul.* 42: 145- 151
- Marcele, G.; Cannata, A., Bertoli, C., Carvalho, R., Amanda, S., Bastos, A., Freitas, M., Carvalho J. (2015). Stress Induced by Heavy Metals Cd and Pb in Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Grown in Nutrient Solution. *Journal of Plant Nutrition*, 38:497–508

- Oliveira, R.C., Araujo, A.R., Carvalho, R., Guilherme, L.R.G., Passos, L.P., Marques, J.J. (2009). Movimento de zinco em colunas de solo tratados com residuo de calcario oriundo de mineracao. *Revista Ceres* 56: 679–684.
- Paim, L. A., Carvalho, R., Abreu, C., Guerreiro, M. (2006). Study of effects of silicon and phosphorus in reducing the availability of heavy metals in mining area]. *Quimica Nova* 29: 28–33.
- Paiva, H. N., Carvalho, J., Siqueira, J. (2002). Translocation index of nutrients in cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) and ipe-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) seedlings submitted to increasing levels of cadmium, nickel and lead. *Revista Arvore* 26: 467–473
- Prieto, J. (2009). Contaminacion y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agrosystems* 10: 29- 44.
- Reigosa, M., Pedrol, N, Sánchez, A. (2004). *La Ecofisiología Vegetal una Ciencia de Síntesis*. Edit. Thomson. España.
- Rengel, Z.& Zhang, W. (2003). Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium- toxicity syndrome. *New Phytologist* 159: 295-314.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en Salud, Ambiente y Seguridad Alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Vol. 16 N° 2, pp. 66-77
- Salas, F. (2007). Selección in vitro de plantas tolerantes a plomo para su uso en fitorremediacion. Tesis de especialista en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana. pp. 40-42
- Sierra, R. (2006). Fitorremediacion de un suelo contaminado con plomo por Actividad Industrial. Tesis de Ingeniero Agrícola y Ambiental. pp. 56
- Silva, V. L., Carvalho, R., Freitas M.P., Tormena, C.F., Melo, W.C. (2007a). Spectrometric and theoretical investigation of the structures of Cu and Pb/DTPA complexes. *Structural Chemistry* 18: 605–609. DOI 10.1007/s11224-007-9192-8
- Silva, V. L., Carvalho, R., Freitas, M.P., Tormena, C.F., Melo W.C. (2007b). Structural determination of Zn and Cd-DTPA complexes: MS, infrared, ¹³C NMR and theoretical investigation. *Spectrochimica Acta A* 69: 1197–1200.
- Sinclair, T.R. (2018). Effective Water Use Required for Improving Crop Growth Rather Than Transpiration Efficiency. *Frontiers in Plant Science* Vol. 19, Article 1442. DOI: 10.3389/fpls.2018.01442
- Vidal, M. (2009). Evaluación de los mecanismos de adsorción y acumulación intracelular de plomo en sistemas continuos de fitorremediacion con *Salvinia minima*. Tesis de maestría en

Ciencias. Instituto de Ecología
A. C. pp. 33

related enzymes. *Acta Physiol. Plant.* 2004. 26 (3): 281-290.

Yamunarani, K., Jaganathan, R., Bhaskaran, R., Govindaraju, P., Velazhahan, R. (2004). Induction of early blight resistance in tomato by *Quercus infectoria* gall extract in association with accumulation of phenolics and defense-

Yıldız, M., Cigerci, I.H., Konuk, M., Fidan, A.F., Terzi, H. (2009). Determination of genotoxic effects of copper sulphate and cobalt chloride in *Allium cepa* root cells by chromosome aberration and comet assays. *Chemosphere* 75, 934–938.

