

Tolerancia de plantas de zonas áridas a metales pesados

Tolerance to heavy metals of plants from arid zones

Lucila Perales-Aguilar¹ , José Antonio Esquivel-Rivera¹ , Héctor Silos-Espino¹ ,
José Cruz Carrillo-Rodríguez²  y Catarino Perales-Segovia^{1‡} 

¹ Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL). Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí km 18, El Llano. 20330 Aguascalientes, Aguascalientes, México.

[‡] Autor para correspondencia (cperales55@hotmail.com)

² Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Valle de Oaxaca (ITVO). Ex Hacienda de Nazareno s/n Agencia de Policía Nazareno Xoxo, Centro. 71230 Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

RESUMEN

En México las zonas áridas representan más de la mitad del territorio, en estos lugares existe erosión debido a la contaminación, por lo que es importante estudiar el nivel de tolerancia de las especies vegetales representativas para restaurar o reforestar. Se evaluaron seis especies de zonas áridas *Agave funkiana*, *A. obscura*, *A. salmiana* de la familia Asparagaceae y *Opuntia cochenillifera*, *O. ficus-indica*, *Pereskia sacharosa*, de la familia Cactaceae. Se propagaron *in vitro* para la obtención de brotes que fueron establecidos a diferentes concentraciones de cadmio (Cd^{2+}) y plomo (Pb^{2+}) durante la etapa de enraizamiento para determinar su tolerancia. Se utilizó el método Probit para calcular la concentración letal media (CL_{50}) de las seis especies a las diferentes dosis. Las diferentes concentraciones de Cd y Pb, produjeron distintos efectos en las seis especies de plantas de zonas áridas evaluadas en esta investigación. *A. salmiana* y *P. sacharosa* obtuvieron una mortalidad de 55% con 0.009 mM de Cd y una mortalidad de 77% con 0.8 mM para Pb, siendo estas concentraciones las más altas. Los bioensayos ecotoxicológicos son útiles para evaluar contaminantes como los metales pesados en plantas tolerantes como *A. obscura*, *O. cochenillifera* y *O. ficus-indica*.

Palabras clave: cadmio, contaminación, método Probit, plomo, propagación *in vitro*.

SUMMARY

In Mexico, arid areas represent more than half of the territory where erosion is due to pollution, so the level of tolerance of representative plant species should be studied to restore or reforest. This study evaluated six species from arid zones – *Agave funkiana*, *A. obscura*, *A. salmiana* of the Asparagaceae family and *Opuntia cochenillifera*, *O. ficus-indica*, *Pereskia sacharosa* of the Cactaceae family. The plants were propagated *in vitro* to obtain shoots that were established at different cadmium (Cd^{2+}) and lead (Pb^{2+}) concentrations during the rooting stage to determine their tolerance. The Probit Analysis was used to calculate the mean lethal concentration (LC_{50}) at the different doses, which produced different effects in the six species of arid zone plants evaluated in this investigation. The species *A. salmiana* and *P. sacharosa* obtained a mortality of 55% with 0.009 mM of Cd and 77% with 0.8 mM for Pb. These concentrations were the highest. Thus, ecotoxicological bioassays are useful for evaluating contaminants, such as heavy metals in tolerant plants as *A. obscura*, *O. cochenillifera*, and *O. ficus-indica*.

Index words: cadmium, contamination, Probit method, lead, *in vitro* propagation.

Cita recomendada:

Perales-Aguilar, L., Esquivel-Rivera, J. A., Silos-Espino, H., Carrillo-Rodríguez, J. C. y Perales-Segovia, C. 2020. Tolerancia de plantas de zonas áridas a metales pesados. *Terra Latinoamericana* 39: 1-8. e-759. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.759>

Recibido: 02 de marzo de 2020. Aceptado: 04 de agosto de 2020.
Artículo. Volumen 39, enero de 2021.

INTRODUCCIÓN

México se conforma de extensas regiones de zonas semiáridas, áridas y muy áridas; de los 32 estados que integran el territorio nacional, 25 presentan porciones áridas en mayor o menor proporción. En estos ecosistemas la escasez de agua limita el desarrollo de la flora (Davies *et al.*, 2012). Sin embargo, existe alta distribución de agaves y cactáceas en México, que son plantas representativas y muy importantes para los habitantes de estas zonas (García-Mendoza, 2007; Jiménez-Sierra, 2011). Las principales características de esas especies, son que presentan ciclos de vida muy largos, bajas tasas de crecimiento y varias de ellas tienen un mecanismo de reproducción sexual ineficiente, lo que dificulta su propagación masiva por semilla (Santos-Díaz *et al.*, 2010). El *Agave salmiana* es una especie que se encuentra en peligro de extinción y *Pereskia sacharosa* se encuentra amenazada de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM 059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010). Las plantas necesitan de micronutrientes esenciales para vivir como Cu, Fe, Mn y Zn, que son considerados metales pesados, pero existen otros como Cd y Pb que son tóxicos para las plantas, inclusive en pequeñas concentraciones (Reddy *et al.*, 2013; Esetlili *et al.*, 2014) y son contaminantes altamente tóxicos encontrados en suelos de México. Los metales pesados en el suelo se derivan principalmente de la actividad minera, la contaminación afecta directamente el crecimiento de la vegetación (pérdida de cobertura del suelo) en el área de la mina y en sus alrededores; lo cual es una problemática a nivel mundial (Hu *et al.*, 2018). Los riesgos sobre el ambiente se pueden evaluar basándose en el efecto sobre organismos vivos como las plantas, utilizando la variable concentración letal media (CL_{50}), calculada a partir de bioensayos con el método Probit (UC-Peraza y Delgado-Blas, 2012), dichos bioensayos, son una herramienta que sirve para determinar los riesgos ambientales (Pentreath *et al.*, 2015). El cultivo *in vitro* de tejidos vegetales involucra el crecimiento de células y tejidos en laboratorio, en condiciones de asepsia; es muy útil en actividades de investigación porque se tiene disponible el material vegetal y el tiempo de experimentación se reduce considerablemente, comparado con el uso de plantas enteras, lo que permite obtener una respuesta más rápida y efectiva de las plantas al medioambiente contaminado (Couselo *et al.*, 2010). El objetivo de este

trabajo fue evaluar la tolerancia a dos metales pesados Cd^{+2} y Pb^{+2} que se encuentran entre los más tóxicos, mediante la CL_{50} de plantas de zonas áridas propagadas *in vitro*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

Se seleccionaron seis especies, tres de la familia Asparagaceae *Agave funkian* (K. Koch & C. D. Bouché), *Agave obscura* (Schiede ex Schltdl.), *Agave salmiana* (Otto ex Salm-Dyck); y tres de la familia Cactaceae *Opuntia cochenillifera* (Linnaeus & P. Miller), *Opuntia ficus-indica* (Linnaeus & P. Miller), y *Pereskia sacharosa* (Grisebach), con base en un trabajo previo de plantas tolerantes de zonas áridas (Perales-Aguilar *et al.*, 2020).

Propagación *in vitro* del Material Vegetal

La multiplicación de las especies se llevó a cabo mediante propagación *in vitro*, colocando cuatro explantes por frasco con capacidad de 500 mL, se añadieron 60 mL del medio MS (Murashige y Skoog, 1962), adicionados con 8 g L⁻¹ de agar más 2 mg L⁻¹ de Benciladenina (BA) para la familia Asparagaceae y 10 g L⁻¹ de agar más 1 mg L⁻¹ de BA para la familia Cactaceae, a pH de 5.7 y con 3% de sacarosa. Los cultivos se mantuvieron a 25 ± 2 °C y con fotoperiodo 16/8 controlado. A los cuatro meses se registró el número y la longitud (cm) de cada brote por explante, se utilizó un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones, n = 16. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para cada familia, utilizando el paquete estadístico GraphPad Prism versión 7.09.

Efecto de los Metales Cd y Pb

Las pruebas de toxicidad se realizaron con los brotes regenerados, se transfirieron a la etapa de enraizamiento en medio MS (1962) sin metales (control) y en medio MS (1962) con metales pesados. Las concentraciones fueron 0.005, 0.007, 0.009 mM para $CdCl_2$ y 0.4, 0.6, 0.8 mM para $Pb(NO_3)_2$, todas las sales con 99% de pureza con grado de reactivo (Perales *et al.*, 2020). A los tres meses de establecidos los bioensayos, se calculó el porcentaje de mortalidad y con

el análisis Probit se calculó la CL_{50} , se realizó un diseño completamente al azar, con $n = 9$, tres repeticiones y análisis de varianza (ANOVA) ($P \leq 0.05$) para validar la prueba. Se utilizó el paquete estadístico GraphPad Prism versión 7.09.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propagación *in vitro*

Las seis especies presentaron respuesta morfogénica diferenciada al desarrollar brotes. Se registraron diferencias estadísticas significativa para la especie *O. cochenillifera*, en el número de brotes por explante, como se observa en el Cuadro 1. Retes-Pruneda *et al.* (2007) propagaron *in vitro* cactáceas, evaluando dos citocininas, Isopenteniladenina (2ip) y BA, en dos especies, *Echinocereus knippelianus*, y *Polaskia chichipe*, que respondieron significativamente a los tratamientos con la hormona vegetal BA.

La familia *Asparagaceae* presentó en promedio seis brotes por explante con una longitud de hasta 5 cm. El *Agave* retiene y conserva agua de lluvia lo que reduce la erosión del suelo, por ello la importancia de su propagación *in vitro* masiva mediante el uso hormonas

Cuadro 1. Resultados de la etapa de propagación *in vitro* de plantas representativas de zonas áridas en México.

Table 1. Results of the *in vitro* propagation stage of representative plants of arid zones in Mexico.

	Número de brotes por explante	Longitud del brote cm
Tratamiento 1		
2 mg L ⁻¹ BA + 8 g L ⁻¹ agar		
<i>Agave funkiana</i>	6.2 ± 1.2	3.8 ± 0.4
<i>Agave obscura</i>	6.8 ± 0.6	4.5 ± 1.3
<i>Agave salmiana</i>	5.9 ± 0.8	5.1 ± 0.9
Tratamiento 2		
1mg L ⁻¹ BA + 10 g L ⁻¹ agar		
<i>Opuntia cochenillifera</i>	9.3 ± 0.9*	4.2 ± 0.6
<i>Opuntia ficus-indica</i>	6.1 ± 1.3	5.1 ± 0.8
<i>Pereskia sacharosa</i>	4.8 ± 0.5	3.9 ± 0.7

Media ± Desviación estándar $n = 16$. * Indica diferencia significativa. Tukey ($P \leq 0.005$).

Mean ± Standard deviation $n = 16$. * Indicates significant difference. Tukey ($P \leq 0.005$).

vegetales como BA (Aguilar-Jiménez y Rodríguez-de la O, 2018). El género *Agave*, se ha propagado *in vitro* exitosamente utilizando concentraciones que van de 1 mg L⁻¹ a 1.5 mg L⁻¹ de BA, generándose hasta 10.5 brotes por explante (Domínguez-Rosales *et al.*, 2008). La propagación *in vitro* se basa en asegurar la subsistencia de las especies vegetales que están comprometidas por la explotación de sus recursos, como lo son las plantas de zonas áridas (Morales-Rubio *et al.*, 2016). En la familia Cactaceae la especie *O. cochenillifera* respondió con 9 brotes por explante y longitud de 4 centímetros.

Efecto de los Metales Pesados Cd y Pb

La mortalidad más alta, 77%, se presentó en el tratamiento con Pb a la concentración de 0.8 mM (Cuadro 2). Los metales pesados como Cd y Pb, inhiben el crecimiento y afecta la fotosíntesis en las plantas incluso en concentraciones subletales (Ouyang *et al.*, 2012).

A. salmiana presentó mortalidad de 55% con el tratamiento 0.009 mM de Cd, y 77% con 0.8 mM de Pb; *A. funkiana* 44% y 66% respectivamente, *O. ficus-indica* y *P. sacharosa* 55% con Cd, 44% y 77% con Pb; y *O. cochenillifera* 55% de mortalidad con Pb. Tanto los valores de mortalidad como los valores de las CL_{50} indican que las especies más sensibles a la concentración más alta, fueron *A. salmiana* y *P. sacharosa*, tanto con Cd 0.009 mM como con Pb 0.8 mM. Las seis especies evaluadas desarrollaron raíz en el tratamiento control, que sólo contenía los metales pesados considerados como micronutrientes, que se encuentran en el medio de cultivo MS (1962). Estas especies al ser propagadas *in vitro* presentaron raíz fasciculada, debido a que la raíz primaria se pierde (Figura 1). Las seis especies desarrollaron raíz en todos los tratamientos. La especie *O. cochenillifera* presentó clorosis y muerte casi total, formando raíz solo en el tratamiento con Pb a 0.8 mM. Por la raíz entran los metales pesados a la planta, mediante adsorción y quelación por fitoquelatinas (Du *et al.*, 2018). Entre las proteínas responsables de la movilidad de Cd al interior de célula se encuentran LCT1, IRT1 y Nramp, localizadas en la membrana de la vacuola (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

En los tratamientos con Cd y Pb, *O. cochenillifera* y *O. ficus-indica* presentaron menor crecimiento de la parte aérea, en comparación con su control. Cuando las plantas son expuestas a metales pesados como Cd

Cuadro 2. Efectos de cadmio (Cd) y plomo (Pb) sobre las plantas establecidas *in vitro* de las zonas áridas de México.
Table 2. Effects of cadmium (Cd) and lead (Pb) on established plants *in vitro* from arid zones in Mexico.

Especies	Cd ²⁺		Pb ²⁺	
	Concentración	Mortalidad	Concentración	Mortalidad
	mM	%	mM	%
<i>Agave funkiana</i>	0	0	0	0
	0.005	11	0.4	22
	0.007	33	0.6	44
	0.009	44	0.8	66
<i>Agave obscura</i>	0	0	0	0
	0.005	11	0.4	11
	0.007	22	0.6	33
	0.009	44	0.8	44
<i>Agave salmiana</i>	0	0	0	0
	0.005	22	0.4	44
	0.007	33	0.6	55
	0.009	55	0.8	77
<i>Opuntia cochenillifera</i>	0	0	0	0
	0.005	11	0.4	11
	0.007	22	0.6	33
	0.009	33	0.8	55
<i>Opuntia ficus-indica</i>	0	0	0	0
	0.005	11	0.4	11
	0.007	33	0.6	33
	0.009	55	0.8	44
<i>Pereskia sacharosa</i>	0	0	0	0
	0.005	33	0.4	55
	0.007	44	0.6	66
	0.009	55	0.8	77

y Pb, se observa una disminución significativa en la formación de raíces. Por lo general, las plantas expuestas a Cd y Pb, tienen mayor concentración del metal en las raíces, por lo que se reduce la acumulación del metal en los brotes (Seregin e Ivanov, 2001; Rajkumar *et al.*, 2009). Los metales pesados como Cd y Pb afectan a las plantas debido a que alteran sus procesos fisiológicos, se reduce el crecimiento y presentan una menor producción de biomasa (Nagajyoti *et al.*, 2010).

En el Cuadro 3 se presentan los valores de toxicidad, CL₅₀, los límites de confianza inferior y superior a 95% de los bioensayos obtenidos por el método Probit, *A. funkiana* y *A. obscura* con CL₅₀ de 0.009 mM en Cd

y *A. obscura* con CL₅₀ de 0.813 mM en Pb. Reddy *et al.* (2013) estudiaron la especie *Oryza sativa* L. con metales considerados como micronutrientes (Cu, Mn y Zn) y los que no lo son como Cd y Pb, los resultados mostraron que el Cd es altamente tóxico, el Pb moderadamente tóxico, y Cu, Mn y Zn son de baja toxicidad. *A. salmiana* presentó CL₅₀ de 0.008 mM para Cd y 0.546 mM para Pb; esta especie de la familia Asparagaceae, es muy emblemática para México y clave para la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de las zonas áridas, por eso la importancia de investigar y estudiar este tipo de plantas (Martínez-Salvador, 2013; Gschalderler, 2017).

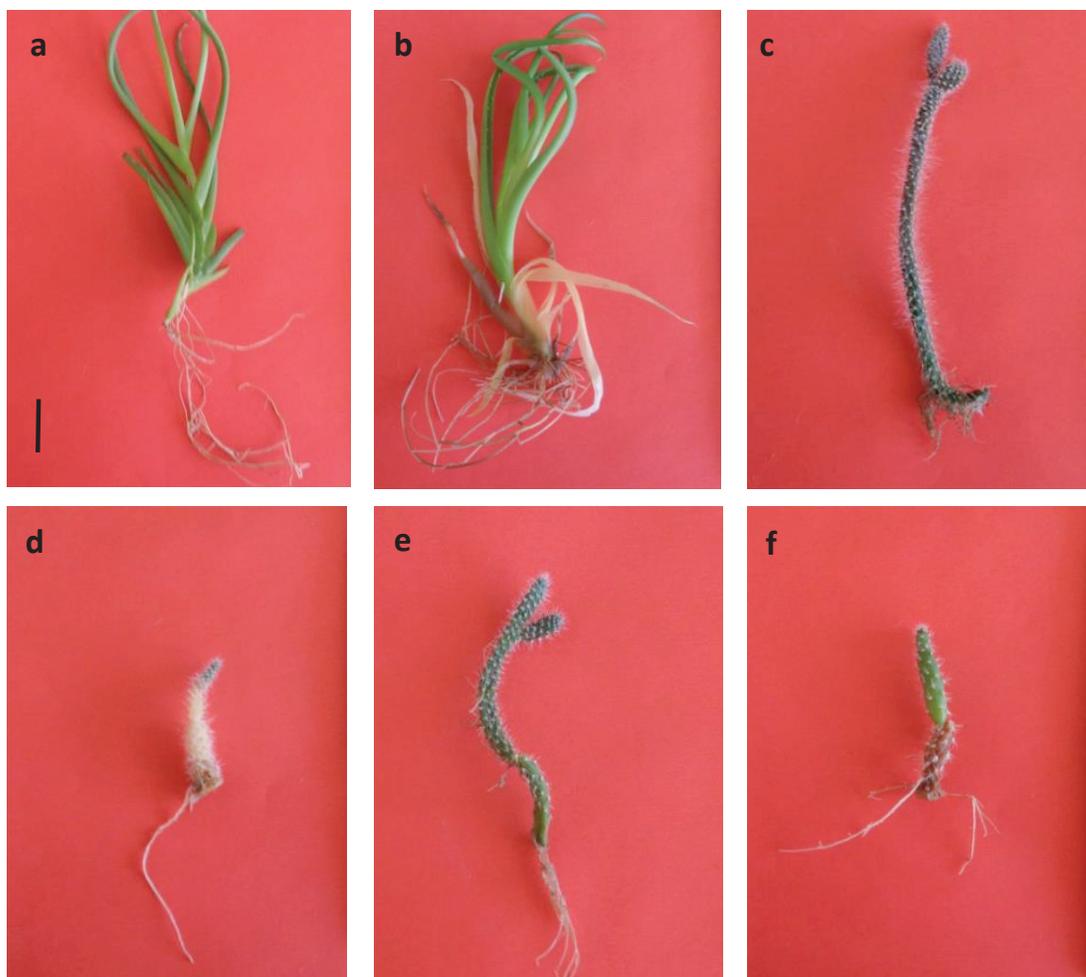


Figura 1. Comportamiento morfológico de las plantas sometidas a metales pesados: (a) *Agave obscura*, control; (b) *A. obscura*, 0.009 mM de Cd; (c) *Opuntia cochenillifera*, control; (d) *O. cochenillifera*, 0.8 mM de Pb; (e) *O. ficus-indica*, control y (f) *O. ficus-indica*, 0.8 mM de Pb en zonas áridas de México.

Figure 1. Morphological behavior of plants subjected to heavy metals: (a) *Agave obscura*, control; (b) *A. obscura*, 0.009 mM Cd; (c) *Opuntia cochenillifera*, control; (d) *O. cochenillifera*, 0.8 mM Pb; (e) *O. ficus-indica*, control and (f) *O. ficus-indica*, 0.8 mM Pb in arid zones in Mexico.

O. ficus-indica presentó CL_{50} de 0.008 mM con Cd y 0.813 mM con Pb. En un estudio de toxicidad de cadmio y plomo en *Brachiaria arrecta*, los resultados mostraron mayor deterioro en raíces, tallos y hojas de las plantas, cuando fueron expuestas a Pb, que cuando se expusieron a Cd; la bioconcentración de metales pesados en los tejidos vegetales ocasiona trastornos histológicos, como los presentados en esta especie de planta, que resultó muy susceptible (Peláez *et al.*, 2014).

O. cochenillifera presentó CL_{50} de 0.010 mM con Cd y 0.755 mM con Pb. Pokorska-Niewiada *et al.* (2018) realizó un estudio similar, con Cd y

Pb, las concentraciones dependieron del contenido permitido en suelo para cada metal durante el proceso de germinación de semillas, el grado de toxicidad del metal se determinó calculando los valores de CL_{50} y encontraron que las semillas más sensibles fueron las de cebada para Cd y berro para Pb. El cadmio y el plomo inhiben la proliferación y división celular de los meristemos, provocando daño a la planta incluso en bajas concentraciones (Lin y Aarts, 2012).

Las diferentes concentraciones de los metales cadmio y plomo produjeron efectos distintos en las seis especies estudiadas. De las seis especies evaluadas, las que toleraron las concentraciones más altas de Cd y Pb

Cuadro 3. Concentración letal media de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en las especies propagadas *in vitro*.
Table 3. Mean lethal concentration of cadmium (Cd) and lead (Pb) in species propagated *in vitro*.

Especies	Cd ²⁺			Pb ²⁺		
	CL50	LC 95%	LC 95%	CL50	LC 95%	LC 95%
	mM	Inferior	Superior	mM	Inferior	Superior
<i>A. funkiana</i>	0.009	0.007	0.04	0.659	0.508	0.957
<i>A. obscura</i>	0.009	0.007	0.04	0.813	0.638	2.54
<i>A. salmiana</i>	0.008	0.006	0.019	0.546	0.368	0.743
<i>O. cochenillifera</i>	0.010	0.009	0.008	0.755	0.607	1.46
<i>O. ficus-indica</i>	0.008	0.007	0.09	0.813	0.638	2.54
<i>P. sacharosa</i>	0.007	0.005	0.015	0.048	0.291	0.606

CL₅₀ = concentración letal media; LC = límite de confianza; n = 9.

CL₅₀ = mean lethal concentration; LC = confidence limit; n = 9.

fueron *A. obscura*, *O. cochenillifera* y *O. ficus-indica*. Las plantas como respuesta a la toxicidad de Cd y Pb, han desarrollado mecanismos de defensa que se basan en la acumulación del metal en las raíces (Silva *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES

La especie que mostró la mayor formación de brotes fue *Opuntia cochenillifera* con 9 brotes por explante y las que presentaron mayor longitud fueron *Agave salmiana* y *O. ficus-indica* con brotes de 5 cm. En la determinación de las CL₅₀ las especies con mayor sensibilidad fueron *A. salmiana* y *Pereskia sacharosa*, tanto con cadmio a 0.009 mM, como con plomo a 0.8 mM. Los metales pesados pueden ser altamente tóxicos con mortalidad de hasta 77%, pero *O. cochenillifera* presentó solo 33% de mortalidad con la concentración más alta de cadmio, mientras que las especies *A. obscura* y *O. ficus-indica* toleraron concentraciones más altas de plomo, con 44% de mortalidad. Las especies más tolerantes fueron *A. obscura*, *O. cochenillifera* y *O. ficus-indica*.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor para correspondencia a solicitud razonable y con la autora principal en el correo: lucilaperales4@gmail.com.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

La presente investigación se realizó con fondos del TECNAM para fortalecimiento del posgrado y con recursos propios del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, investigación, software, preparación del borrador original y revisión: L.P.A. Metodología, investigación y revisión: J.A.E.R. Investigación, validación, análisis formal, supervisión y revisión: H.S.E. Metodología, validación, análisis formal y revisión: J.C.C.R. Conceptualización, metodología, investigación, validación, análisis formal, supervisión, adquisición de fondos, revisión y edición: C.P.S.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TECNM) y al Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL).

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Jiménez, D. y J. L. Rodríguez-de la O. 2018. Micropropagación y aclimatación de Maguey Pitzometl (*Agave marmorata* Roetzl.) en la Mixteca Poblana. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 124-131. doi: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n2.77084>.
- Couselo, J. L., E. Corredoira, A. M. Vieitez y A. Ballester. 2010. Aplicación del cultivo *in vitro* de tejidos vegetales en estudios de fitorremediación. *Rev. Real Acad. Galega Cienc.* 29: 77-87.
- Davies, J., L. Poulsen, B. Schulte-Herbruggen, K. Mackinnon, N. Crawhall, W. D. Henwood, N. Dudley, J. Smith, and M. Gudka. 2012. Conserving dryland biodiversity. International Union for the Conservation of Nature (IUCN). Nairobi, Kenia. ISBN: 978-2-8317-1541-4.
- Domínguez-Rosales, M. S., Á. G. Alpuche-Solís, N. L. Vasco-Méndez y E. Pérez-Molphe-Balch. 2008. Efecto de citocininas en la propagación *in vitro* de Agaves mexicanos. *México. Rev. Fitotec. Mex.* 31: 317-322.
- Du, F., Z. Yang, P. Liu, and L. Wang. 2018. Accumulation, translocation, and assessment of heavy metals in the soil-rice systems near a mine-impacted region. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25: 32221-32230. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3184-7>.
- Esetlili, B. C., T. Pekcan, Ö. Cobanoglu, E. Aydogdu, S. Turan, and D. Anac. 2014. Essential plant nutrients and heavy metals concentrations of some medicinal and Aromatic plants. *Can. J. Agric. Sci.* 20: 239-247. doi: http://doi.org/10.1501/TARIMBIL_0000001283.
- García-Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. *Ciencias UNAM* 87:14-23.
- Gschalerdler Mathis, A. C. 2017. Panorama del aprovechamiento de los Agaves en México. México. CIATEJ. Guadalajara, Jal., México. ISBN: 978-607-97548-5-3.
- Hu, Z., C. Wang, K. Li, and X. Zhu. 2018. Distribution, characteristics and pollution assessment of soil heavy metals over a typical nonferrous metal mine area in Chifeng, Inner Mongolia. *China Environ. Earth Sci.* 77: 638 (1-10). doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7771-1>.
- Jiménez-Sierra, C. L. 2011. Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. México. *Rev. Dig. Univ.* 12: 1-5.
- Lin, Y. and M. G. M. Aarts. 2012. The molecular of zinc and cadmium stress response in plants. *Cell. Mol. Life Sci.* 69: 3187-3206. doi: <https://doi.org/10.1007/s00018-012-1089-z>.
- Martínez-Salvador, M. 2013. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Libro Técnico No. 5. INIFAP. Cd. Aldama, Chihuahua, México. ISBN: 978-607-37-0177-8.
- Morales-Rubio, M. E., C. Espinosa-Leal y R. A. Garza-Padrón. 2016. Cultivo de tejidos vegetales y su aplicación en productos naturales. Capítulo 11. pp. 351-410. *In: C. Rivas-Morales, M. A. Oranday-Cardenas y M. J. Verde-Star (eds.). Investigación en plantas de importancia médica.* OmniaScience. Barcelona, España. doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.315>.
- Murashige, T. and F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15: 473-497. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
- Nagajyoti, P. C., K. D. Lee, and T. V. M. Sreekanth. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 8: 199-216. doi: <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>.
- Ouyang, H., X. Kong, W. He, N. Qin, Q. He, Y. Wang, R. Wang, and F. Xu. 2012. Effects of five heavy metals at sub-lethal concentrations on the growth and photosynthesis of *Chlorella vulgaris*. *China. Chin. Sci. Bull.* 57: 3363-3370. doi: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5366-x>.
- Peláez-P., M., F. Casierra-Posada y G. A. Torres-R. 2014. Tóxicidad de cadmio y plomo en pasto Tanner *Brachiaria arrecta*. *Rev. Cienc. Agríc.* 32: 3-13. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.143102.27>.
- Pentreath, V., E. González, M. Barquín, S. M. Ríos y S. Perales. 2015. Bioensayo de toxicidad aguda con plantas nativas para evaluar un derrame de petróleo. *Rev. Salud Ambient.* 15: 13-20.
- Perales-Aguilar, L., M. del S. Santos-Díaz, Y. A. Gómez-Aguirre, M. S. Ramos-Gómez y E. Pérez-Molphe-Balch. 2020. Análisis *in vitro* de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. *Nova Scientia* 12: 1-22. doi: <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2081>.
- Pokorska-Niewiada, K., M. Rajkowska-Myśliwiec, and M. Protasowicki. 2018. Acute lethal toxicity of heavy metals to the seeds of plants of high importance to Humans. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 101: 222-228. doi: <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2382-9>.
- Rajkumar, K., S. Sivakumar, P. Senthilkumar, D. Prabha, C. V. Subbhurann, and Y. C. Song. 2009. Effects of selected heavy metals (Pb, Cu, Ni and Cd) in the aquatic medium on the restoration potential and accumulation in the stem cuttings of the terrestrial plant, *Talinum triangulare* Linn. *Ecotoxicology* 18: 952-960. doi: <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0371-9>.
- Reddy, M. V., D. Satpathy, and K. S. Dhiviya. 2013. Assessment of heavy metals (Cd and Pb) and micronutrients (Cu, Mn and Zn) of paddy (*Oryza sativa* L.) field surface soil and water in a predominantly paddy-cultivated area at Puducherry (Pondicherry, India), and effects of the agricultural runoff on the elemental concentrations of a receiving rivulet. *Environ. Monit. Assess.* 185: 6693-6704. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3057-3>.
- Retes-Pruneda, J. L., M. de L. Valadez-Aguilar, M. E. Pérez-Reyes y E. Pérez-Molphe-Balch. 2007. Propagación *in vitro* de especies de *Echinocereus*, *Escontria*, *Mammillaria*, *Melocactus* y *Polaskia* (Cactaceae). *Bol. Soc. Bot. Méx.* 81: 9-16. doi: <https://doi.org/10.17129/botsoci.1761>.
- Rodríguez-Serrano, M., N. Martínez-de la Casa, M. C. Romero-Puertas, L. A. del Río y L. M. Sandalio. 2008. Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas* 17: 139-146.

- Santos-Díaz, M. S., E. Pérez-Molphe-Balch, R. Ramírez-Malagón, H. G. Núñez-Palenius, and N. Ochoa-Alejo. 2010. Mexican threatened cacti: current status and strategies for their conservation. pp. 1-60. *In*: G. H. Tepper. Species diversity and extinction. Nova Science Publisher. Hauppauge, NY, USA. ISBN: 978-1-61668-343-6.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. SEMARNAT. México, D. F. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091. (Consulta: octubre 26, 2020).
- Seregin, I. V. and V. B. Ivanov. 2001. Physiological aspects of cadmium and lead toxic Effects on higher plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 48: 523-544. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1016719901147>.
- Silva, J. R. R., A. R. Fernández, M. L. Silva Junior, C. R. C. Santos, and A. K.S. Lobato. 2018. Tolerance mechanisms in *Cassia alata* exposed to cadmium toxicity-potential use for phytoremediation. *Photosynthetica* 56: 495-504. doi: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0698-z>.
- UC-Peraza, R. G. y V. H. Delgado-Blas. 2012. Determinación de la concentración letal media (CL₅₀) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en *Laeonereis culveri* (Webster 1879) (Polychaeta: Annelida). México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 28: 137-144.