

TOLERANCIA GERMINATIVA DE LEGUMINOSAS EXPUESTAS A SUELO CON As, Cd, Cr Y Pb DE LA LAGUNA LA ESCONDIDA, TAMAULIPAS, MÉXICO

Germination tolerance of legumes exposed to soil with As, Cd, Cr and Pb from La Escondida lagoon, Tamaulipas, Mexico

Daneli OLIVARES-SEGURA¹, Sandra Grisell MORA-RAVELO^{2*}, Amparo MAURICIO-GUTIÉRREZ^{3**}, Arturo MORA-OLIVO², Griselda GAONA-GARCÍA⁴ y Madai ROSAS-MEJÍA⁴

¹ Instituto de Ecología Aplicada, Universidad Autónoma de Tamaulipas. División del Golfo 356, Col. Amp. la Libertad, Cd. Victoria, C.P. 87019, Tamaulipas, México.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Supermanzana Campus, Centro Universitario, C.P. 87149 Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

³ Centro de Agroecología. Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edificio VAL 1, Km 1.7 carretera San Baltazar Tetela, Ecocampus Valsequillo, San Pedro Zacachimalpa, C.P. 72960, Puebla, México.

⁴ Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Km. 5 carretera a Mante s/n, C.P. 87000. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

Autoras para correspondencia: * sgmora@docentes.uat.edu.mx y ** amg2510@hotmail.com

(Recibido: mayo 2025; aceptado; febrero 2026)

Palabras clave: fabaceae, fitotoxicidad, índice de germinación.

RESUMEN

El crecimiento urbano y el desarrollo de actividades industriales en Reynosa, Tamaulipas, México, han afectado el suelo de la laguna La Escondida con As, Cd, Cr y Pb, elementos potencialmente tóxicos (EPT). Sin embargo, dentro de la laguna se encuentran leguminosas como *Neltuma glandulosa*, *Parkinsonia aculeata*, *Leucaena leucocephala* que pueden ser utilizadas como ensayo preliminar de tolerancia para la fitorremediación de la laguna. En este estudio se evaluó la tolerancia germinativa de leguminosas expuestas al suelo de la laguna. Se cuantificaron parámetros físicos y químicos del suelo (clase textural, N, P K, CIC, pH y conductividad eléctrica), luego se prepararon extractos acuosos para la germinación (10 semillas se colocaron sobre papel adsorbente en cajas Petri y se les añadieron 13.5 mL del extracto); durante una semana se cuantificó el porcentaje de germinación (PG), PG relativo (PGR), longitud radicular relativa (LRR) e índice de germinación (IG). Los parámetros físicos y químicos fueron analizados con la prueba de Tukey, posteriormente se relacionó las medias de las variables de germinación vía Amva y finalmente todas las variables de estudio se relacionaron con un análisis de componentes principales (ACP). Los resultados mostraron que *N. glandulosa* y *P. aculeata* presentan un IG mayor (73.06 y 100 % respectivamente) son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) a *A. lebbeck* y *L. leucocephala* en PGR, LRR e IG. El ACP indica que estos mismos parámetros tienen una contribución 5.90 % en *N. glandulosa* y *P. aculeata* que en las dos últimas especies. *N. glandulosa* y *P. aculeata* son tolerantes a los EPT.

Key words: fabaceae, phytotoxicity, germination index.

ABSTRACT

Urban growth and industrial development in Reynosa, Tamaulipas, Mexico have contaminated the soil of the La Escondida lagoon with potentially toxic elements (PTE), such as As, Cd, Cr, and Pb. However, legumes such as *Neltuma glandulosa*, *Parkinsonia aculeata*, and *Leucaena leucocephala* are found within the lagoon and can be used as a preliminary tolerance test for phytoremediation. This study evaluated the germination tolerance of legumes exposed to the lagoon soil. Physical and chemical soil parameters (texture class, N, P, K, CIC, pH, and electrical conductivity) were quantified. Aqueous extracts were then prepared for germination (10 seeds were placed on absorbent paper in Petri dishes, and 13.5 mL of the extract was added). Germination percentage (GP), relative GPR, relative root length (RRL), and germination index (GI) were measured over one week. The physical and chemical parameters were analyzed using Tukey's test. Subsequently, the means of the germination variables were correlated via Manova, and finally, all study variables were correlated using principal component analysis (PCA). The results showed that *N. glandulosa* and *P. aculeata*, with a higher germination index (GI) (73.06% and 100%, respectively), are significantly different ($P \leq 0.05$) from *A. lebeck* and *L. leucocephala* in GPR, RRL, and GI. The PCA indicates that these same parameters have a 5.90% contribution in *N. glandulosa* and *P. aculeata* compared to the latter two species. *N. glandulosa* and *P. aculeata* are tolerant to EPTs.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, de acuerdo con Ochoa-Ochoa et al. (2009), una de las estrategias más efectivas para mitigar y prevenir los efectos derivados por cambio en el uso de suelo y la deforestación, se fundamentan en el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP).

En Reynosa, Tamaulipas, México, el crecimiento urbano y el desarrollo de actividades industriales como la petroquímica y la manufacturera traen graves consecuencias ambientales (González-Dávila et al. 2019, Cavazos-Castillo 2021), debido a la dispersión de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como As, Be, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y V, que se encuentran regulados por la normativa mexicana (Covarrubias y Peña-Cabriales 2017, Wong-Argüelles et al. 2021).

La laguna La Escondida fue decretada como un Área Natural Protegida (ANP) y presenta un deterioro en la calidad del agua por recepción de efluentes domésticos, urbanos e industriales y por la acumulación de residuos sólidos. Asimismo, durante la temporada de lluvias, existe un arrastre de contaminantes sólidos y sedimentos que provoca inundación alrededor de la laguna; ocasionando azolvamiento, acumulación de basura y materiales artificiales (vidrio, acero, plástico), lo que afecta negativamente la calidad del suelo aledaño (GOBTAM y SEA 2014).

Una de las causas del deterioro ambiental de la laguna es la contaminación por As, Cr, Cd, Hg y Pb (Herrera y Lombardi 2021), que representan un gran riesgo para cualquier ser vivo, debido a que en altas

concentraciones pueden causar daños fisiológicos y metabólicos a los propios organismos acuáticos (Argota et al., 2012, González-Chávez et al. 2017, Pabón et al. 2020, Gutiérrez-Jaime et al. 2024), además influyen en el deterioro de la calidad ambiental al alterar las propiedades y funciones del ecosistema (Pouresmaeli et al. 2022, Thalassinis et al. 2023, Iannacone et al. 2024). Los EPT se infiltran por la matriz del suelo y llegan a los mantos freáticos o se dispersan en cuerpos de agua superficiales (Bhat et al. 2022).

Una estrategia clave dentro de la fitorremediación es la restauración y conservación con especies tolerantes a EPT. Esta es una alternativa sustentable al utilizar plantas con la capacidad genética de sobrevivir y crecer en ambientes contaminados (López-Hernández y Morales-Hernández 2022, Huslina et al. 2024). En la familia Fabaceae (leguminosas) se han reportado especies con la capacidad de crecer y de tolerar algunos EPT, entre otras, *Neltuma leavigata*, *Acacia farnesiana* y *Clitoria ternatea* (Noguez-Inesta et al. 2017, Duarte-Zaragoza et al. 2020, Chan-Quijano et al. 2021). *Neltuma glandulosa* es una planta que habita dentro de la laguna La Escondida y ha sido reportada por crecer en ambientes con presencia de Cu, sin presentar toxicidad sobre su actividad fotosintética (González-Mendoza et al. 2017). Chan-Quijano et al. (2021) indican que en Reynosa se encuentran otras especies de Fabaceae con alta tolerancia a metales pesados como Cd, Pb, Cu, Ni y Zn, entre las que destacan *Lupinus* sp. y *Neltuma laevigata*, esta última además capaz de

tolerar As, lo que sugiere su potencial uso en estrategias de restauración ecológica y fitorremediación de suelos contaminados.

Las respuestas de las especies pueden variar según el tipo de contaminante y su concentración; por ello, es importante considerar los diferentes factores que determinan la viabilidad de una especie dentro de un proceso de restauración, tales como la tolerancia a la presencia de EPT, la resistencia al estrés hídrico o salino y la capacidad de adaptación a fluctuaciones de temperatura (Guzmán-Castro et al. 2022). También se deben considerar diversos mecanismos de resistencia desarrollados en la producción de compuestos orgánicos como glutatión (GSH), fitoquelatinas, (PCs), metalotioneinas (MT), y/o enzimas como la catalasa (CAT), la superóxido dismutasa (SOD), la ascorbato peroxidasa (APX) y la glutatión reductasa que mejoran el estrés oxidativo (Thalassinis et al. 2023).

Por lo anterior, resulta fundamental evaluar especies vegetales que sean tolerantes a EPT, ya que estos pueden alterar el metabolismo de las plantas e inhibir su crecimiento desde la etapa de germinación (Altonar-Gómez et al. 2021).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la tolerancia germinativa de leguminosas expuestas a suelo con As, Cd, Cr y Pb de la laguna La Escondida, Reynosa, Tamaulipas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

La laguna La Escondida, se localiza en las coordenadas 26°3'20.45 latitud norte y 98°15'44.84 longitud. Tiene una superficie aproximada de 320 ha y una profundidad que se estima entre 30 cm a 1.63 m. con precipitación media anual de 605.7 mm y una temperatura media anual de 23.64°C. Su origen radica en escurrimientos naturales (pluviales, superficiales y subterráneos), donde el Río Bravo es su principal afluente.

De acuerdo con la clasificación climática de Vargas et al. (2007), Reynosa pertenece al grupo de climas secos "B", tipo semiseco "BS" (con lluvias en verano y escasas durante el resto del año), con subtipos semisecos muy cálidos y cálidos (lluvias de verano), y clima semiárido cálido (h) con verano lluvioso (hw), donde el porcentaje de lluvia invernal supera el 10.2 %. Estas condiciones climáticas favorecen el crecimiento de herbáceas y de plantas xerófitas, incluyendo matorrales xerófilos y pastizales halófilos y gipsófilos. La vegetación original estaba dominada por el Matorral Espinoso Tamaulipeco, el cual ha sido reducido y fragmentado por actividades

antrópicas (GOBTAM y SEA 2014). Estas características ambientales permiten la germinación y el desarrollo de especies de la familia Fabaceae como *Neltuma glandulosa*, *Parkinsonia aculeata* y *Leucaena leucocephala*, especies presentes en la laguna y, por tanto, tolerantes a la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT).

Muestreo de suelo y colecta de semillas

En la laguna La Escondida se seleccionaron dos puntos de muestreo mediante identificación aleatoria: sitio 1 (26°03'10" N, 98°16'04" W), ubicado detrás del Parque Cultural de Reynosa, y sitio 2 (26°02'31" N, 98°16'31" W), cercano a una salida de aguas residuales que se vierten directamente al cuerpo de agua.

El muestreo se realizó en enero de 2024. Se recolectaron 4 kg de muestras de suelo para realizar el análisis físico y químico de cada sitio con dos repeticiones, a una profundidad de 0 a 25 cm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno con cierre hermético.

Las leguminosas seleccionadas fueron *Parkinsonia aculeata*, *Neltuma glandulosa* y *Leucaena leucocephala* las cuales se encuentran dentro de la laguna y *Albizia lebbbeck*, una especie que puede contribuir a la restauración de la laguna (Hooker 1842). De todas las especies se colectaron vainas con semillas para su extracción y posterior ensayo de germinación.

Análisis físico y químico del suelo

Se realizó la cuantificación del contenido As, Cd, Cr y Pb (ISO 1995) con controles de calidad analítica mediante muestras blanco y estándar de referencia, siendo su lectura en dos réplicas analizadas en el laboratorio de química de suelos del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Estado de México. Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente, maceradas y tamizadas. Posteriormente, se tomaron 10 g de cada muestra para realizar la extracción con 20-30 mL de ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA) 0.005 M marca Merck, bajo agitación constante durante 2 h. El extracto se filtró mediante papel Whatman No. 42 y el filtrado resultante fue analizado mediante espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer, modelo 3110, EUA). Los parámetros físicos y químicos como: clase textural del suelo, fósforo y potasio, la capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total (micro Kjeldahl), pH (potenciómetro marca Hanna, modelo 5521, EUA), y conductividad eléctrica (conductímetro, marca Orion modelo 701a, EUA) se realizaron de acuerdo con lo establecido en laS NOM-021-SEMARNAT-2000 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF 2002,

2007), donde la materia orgánica se determinó mediante el método por pérdida por ignición de Nelson y Sommers (1982).

Preparación de extractos acuosos

Se preparó un extracto acuoso de suelo para cada uno de los dos sitios de muestreo, donde previamente el suelo fue tamizado con una malla No. 16 (1 mm). Luego, por cada gramo de suelo se agregó 13.5 mL de agua destilada y se llevó a agitación por 30 min a 500 rpm en un rango de temperatura de 18 a 37 °C (Sánchez-Puente et al. 2020).

Características de las semillas

P. aculeata presenta semillas oscuras verdosas con moteado pardo o púrpura, son ovoides o elipsoidales, algo comprimidas, provistas de cubiertas duras que necesitan recibir algún tratamiento pregerminativo (Sanz-Elorza et al. 2004).

L. leucocephala tiene semillas ligeramente elípticas, aplanadas, color café brillante, con una cubierta dura por una cera lo que la hace impermeable de la semilla inhibiendo la absorción de agua, lo que retarda la absorción de agua durante la germinación. Por lo que las semillas requieren un tratamiento previo para promover una germinación rápida y uniforme (Bakewell-Stone 2023).

A. lebbeck tiene semillas oblongas, achatadas, color castaño, presenta latencia física debida a la gruesa cubierta impermeable (Vázquez-Yanes et al. 1999).

N. glandulosa tiene semillas ovoides, ligeramente aplastadas, de color café amarillo. Las semillas están rodeadas por un duro endocarpo y su cubierta seminal es dura e impermeable. Todo esto les confiere latencia física (Illescas-Gallegos et al. 2021).

Tratamientos pre germinativos

Se realizaron ensayos exploratorios para la estandarización de los tratamientos pregerminativos aplicables a cada especie. Se utilizaron 100 semillas por cada tratamiento con 10 repeticiones para cada una de las especies seleccionadas *P. aculeata*, *L. leucocephala*, *N. glandulosa* y *A. lebbeck* (método modificado de Sánchez-Puente et al. 2020). Se realizaron tratamientos pre germinativos a las semillas de cada especie a través de escarificación física, química y térmica (Sánchez et al. 2023, Ruiz-Carranza et al. 2024).

Para *P. aculeata*, *L. leucocephala* y *A. lebbeck* se realizó una escarificación química con una solución al 50 % (v/v) de H₂SO₄ de 10 a 30 min, dependiendo de la dureza de la cubierta de sus semillas (Dachung et al. 2023). Después se lavaron con agua destilada tres

veces para luego realizar una escarificación física en el área del micrópilo de cada semilla, debido que no fue suficiente la escarificación con H₂SO₄. Finalmente las semillas fueron desinfectadas con una solución de hipoclorito de sodio al 5 % (v/v) durante 3 min y se dejaron reposar en agua destilada por 24 h (la dureza de cubierta de la semilla la hace impermeable inhibiendo la absorción de agua) (Soares-Bichoff et al. 2018, Argentel-Martínez et al. 2022). Para las semillas de *N. glandulosa* se empleó escarificación física en el área del micrópilo. Se lavaron con agua destilada y posteriormente se realizó escarificación térmica con agua destilada a 50 °C durante 30 min y se prosiguió a la desinfección y el reposo por 24 h (Illescas-Gallegos et al. 2021).

Ensayos de germinación

Para el ensayo de germinación se incluyeron tres tratamientos: Testigo (T0), tratamiento con el extracto acuoso del sitio 1 (T1) y tratamiento con el extracto acuoso del sitio 2 (T2). Cada tratamiento tuvo 10 repeticiones y cada repetición contenía 10 semillas sobre papel absorbente en cajas Petri estériles. Se añadieron 13.5 mL del extracto acuoso para cada tratamiento correspondiente de las especies *N. glandulosa*, *P. aculeata* y *L. leucocephala*; para *A. lebbeck* se agregó 7.5 mL del extracto acuoso (debido a que la misma cantidad afectaba la viabilidad de las semillas), como testigo se colocaron las semillas de cada especie en agua destilada (Sánchez-Puente et al. 2020). Después, las cajas Petri fueron incubadas en oscuridad de acuerdo con Reino et al. (2011) y Fernández et al. (2023). Se consideró como semilla germinada un crecimiento radicular de mínimo 2 mm (Torres y Renison 2020); las semillas fueron monitoreadas diariamente durante siete días con una regla métrica para calcular las variables de germinación.

Determinación de variables las variables de germinación

Se cuantificó el porcentaje de germinación (PG) que se refiere al porcentaje de semillas germinadas de la muestra para un periodo de tiempo final (siete días); de acuerdo con la ecuación 1:

$$PG = \left(\frac{\text{número de semillas germinadas}}{\text{número total de semillas}} \right) * 100 \quad (1)$$

El tiempo medio de germinación (TMG) es un indicador de viabilidad y calidad de las semillas que ayuda a planificar el crecimiento desde la siembra hasta la aparición de la plántula; se calcula de acuerdo con la ecuación 2:

$$TMG = \frac{\sum \left(\frac{\text{número de semillas germinadas en el tiempo} * (\text{tiempo de observación})}{\sum \text{número total de semillas germinadas}} \right)}{\sum \text{número total de semillas germinadas}} \quad (2)$$

El tiempo modal de germinación (TMoG) es el tiempo (días) donde existe la mayor frecuencia de semillas germinadas, es decir expresa el pico o los picos germinativos (Ranal y Santana 2006).

Se calculó la tasa de crecimiento radicular (TCR) expresada en cm/d por medio del cálculo de la pendiente del modelo lineal $y = mx + b$, obtenida de la medición del crecimiento radicular con respecto al tiempo, para cada tratamiento.

Se determinó el porcentaje de germinación relativo (PGR), longitud radicular relativa (LRR) e índice de germinación de Zucconi (IG) (Carbó et al. 2023, Zapata-González et al. 2023), de acuerdo con las ecuaciones 3, 4 y 5:

$$PGR = \left(\frac{\text{número de semillas germinadas en el extracto}}{\text{número de semillas germinadas en el control}} \right) * 100 \quad (3)$$

$$LRR = \left(\frac{\text{longitud radicular promedio del extracto}}{\text{longitud radicular promedio del control}} \right) * 100 \quad (4)$$

$$IG = \frac{PGR * LRR}{100} \quad (5)$$

El PGR se refiere al porcentaje de semillas germinadas por un periodo de tiempo expuestos a una fuente de contaminación con respecto a las semillas testigo. La LRR indica el índice de tolerancia radicular presentado en porcentaje y el IG evalúa el grado de sensibilidad de una planta ante la presencia de contaminantes por medio de ensayos de fitotoxicidad (Carbó et al. 2023) de acuerdo con el método de Zucconi et al. (1981). Si el valor de $IG \leq 50 \%$ se refiere a una toxicidad severa, valores de $50 < IG < 80 \%$ es una toxicidad moderada y $IG > 80 \%$ es baja fitotoxicidad (Varnero et al. 2007, Carroza et al. 2020, Zapata-González et al. 2023).

Análisis estadístico

Se utilizó el programa R versión 4.3.1 (2023) para el tratamiento de datos. Se calcularon las medidas de tendencia central y de dispersión (media y desviación estándar), para identificar el valor típico y las tendencias de las variables estudiadas. Se utilizó el análisis de varianza de una vía (Andeva) para probar diferencias significativas entre los tratamientos del

suelo del sitio 1 y sitio 2 y las variables de los parámetros físicos y químicos del suelo. Antes de analizar los datos, se comprobó el ajuste de los residuos a la distribución normal y la homogeneidad de la varianza según la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) y la prueba de Levene ($p > 0.05$), respectivamente. Las diferencias significativas fueron analizadas con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Se utilizó un análisis multivariado de varianza (Amva) para probar diferencias significativas entre los tratamientos del extracto acuoso del suelo del sitio 1, sitio 2 y testigo y las variables de germinación de cada especie. Para separar los tratamientos según las mediciones cuantitativas de germinación, se utilizó la prueba de Tukey para realizar las comparaciones múltiples de medias por pares ($p < 0.05$).

Se empleó el promedio de cada variable para aplicar un análisis de componentes principales (ACP). Este análisis describe la variación de las variables que representan una proporción sustancial de la variación en las variables originales (Everitt y Hothorn 2011). Para calcular y visualizar el ACP se utilizaron los paquetes FactoMineR y Factoextra. El ACP muestra las dimensiones convenientes inferiores de cada variable, útiles para analizar las relaciones fisicoquímicas y los parámetros morfológicos con respecto a la germinación. Se utilizó los eigenvalores y la varianza porcentual acumulada para determinar el número de componentes principales (Kaiser 1961, Kassambara 2017b). Además, se realizó un análisis por grupos (*clustering*) que permite reunir los tratamientos con características similares con los métodos de agrupamiento como *k-means* e índices usando el paquete NbClust que coincide con el valor numérico de 2 de acuerdo con la regla de mayoría (Kassambara 2017a), como “kl”, “mcclain”, “gamma”, “gplus”, “dunn”, “sdindex”, “ptbiserial” que fueron comprobados por los métodos gráficos de “Elbow” y “Silhouette”.

RESULTADOS

Los suelos de la laguna La Escondida presentaron una textura franca arcillo-arenosa y los parámetros químicos analizados mostraron diferencias significativas $p \leq 0.05$ (Tukey), entre los dos sitios con el análisis de una vía. En el suelo del sitio 1 se presentaron mayores concentraciones en los parámetros físicos y químicos, mientras que las concentraciones de EPT fueron altas en el sitio 2 (**Cuadro I**). Los valores de pH para ambos sitios fueron moderadamente alcalinos (7.7 y 7.3 ± 0.1) para los sitios 1 y 2, respectivamente de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (**Cuadro I**).

CUADRO I. ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO DEL SUELO DE LA LAGUNA LA ESCONDIDA, EN REYNOSA, TAMAULIPAS, MÉXICO.

Parámetros	Sitio 1	Sitio 2
Clase textural:	Franco	Franco
	arcillo-arenoso	arcillo-arenoso
Arena (%)	52.9 ± 0.0	56.2 ± 1.2
Arcilla (%)	31.1 ± 0.0	29.1 ± 0.0
Limo (%)	16.0 ± 0.0	14.7 ± 1.2
pH	7.7 ± 0.1 ^a	7.3 ± 0.01 ^b
CE (dS/m)	0.4 ± 0.0 ^b	1.6 ± 0.04 ^a
P (mg/kg)	20.0 ± 0.0 ^a	10.0 ± 0.0 ^b
MO (%)	2.8 ± 0.1 ^a	1.1 ± 0.1 ^b
C _{org.} (%)	1.6 ± 0.1 ^a	0.7 ± 0.1 ^b
N _t (%)	0.1 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.0 ^b
K Int. (%)	3.4 ± 0.1 ^a	1.2 ± 0.1 ^b
CIC (cmol/kg)	14.5 ± 0.1 ^a	9.8 ± 0.1 ^b
EPT (mg/kg)	As Nd	40.1 ± 1.0 ^a
	Cd	0.5 ± 0.0 ^b
	Cr	6.3 ± 0.2 ^b
	Pb	1.0 ± 0.0 ^b
		4.6 ± 0.3 ^a

Los datos representan la media de tres repeticiones (n = 3) ± desviación estándar. Las letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$, Tukey) entre los parámetros físicos y químicos del suelo. CE: Conductividad eléctrica; P: Fósforo; MO: materia orgánica; C_{org.}: carbono orgánico; N_t: nitrógeno total; K Int.: potasio intercambiable; CIC: capacidad de intercambio catiónico; EPT: elementos potencialmente tóxicos, As: arsénico, Cr: cromo, Cd: cadmio, Pb: plomo, Nd: no detectado.

Los resultados de los estudios de germinación (**Cuadro II**) muestran que los parámetros de PG en las especies *N. glandulosa* y *P. aculeata* (especies autóctonas), presentaron los valores más altos y son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$, Amva utilizando la prueba de Wilks), con respecto a las especies alóctonas (*L. leucocephala* y *A. lebbeck*). Los diferentes tratamientos indicaron que la especie *N. glandulosa* no fue afectada en su capacidad de germinación presentando valores del 95 al 99 % ± 3.2, seguida de *P. aculeata* (PG = 92 ± 8.7 al 95 % ± 8.2), por ser especies del sitio estudiado. Sin embargo, *Leucaena leucocephala* presentó un porcentaje de germinación (PG) bajo, que osciló entre 40 ± 17.7 y 44 % ± 14.5, lo cual puede atribuirse a su condición de especie alóctona dentro de la laguna. En contraste, *Albizia lebbeck* mostró una alta capacidad germinativa, con valores de PG entre 75 ± 9.7 y 94 % ± 5.2; estas diferencias resultaron estadísticamente significativas de acuerdo con el análisis multivariado (Amva) y la prueba lambda de Wilks.

Con respecto a TCR, *P. aculeata* tuvo el valor más alto (1.9 cm/d ± 0.7) seguida de *N. glandulosa* (1.4 cm/d ± 0.4), en comparación con *L. leucocephala* (1.0 cm/d ± 1.3) y *A. lebbeck* (0.9 cm/d ± 0.5) siendo diferentes significativamente ($p \leq 0.05$, Amva y Wilks). En TMOG y TMG, los valores más altos fueron para *P. aculeata* (2.8 d ± 1.3) y *A. lebbeck* (1.1 d ± 0.3).

CUADRO II. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE GERMINACIÓN DE LEGUMINOSAS EN SUELO DE LA LAGUNA LA ESCONDIDA, EN REYNOSA, TAMAULIPAS, MÉXICO.

Especies	Tratamiento	PG (%)	TCR (cm/d)	Tiempo de germinación (d)	
				TMOG	TMG
<i>Neltuma glandulosa</i>	T0	99 ± 3.16 ^a	1.00 ± 0.29 ^{bdf}	1.0 ± 0.01 ^b	4.00 ± 0.01 ^b
	T1	95 ± 7.24 ^a	1.37 ± 0.45 ^{bcd}	1.2 ± 0.42 ^{be}	4.01 ± 0.02 ^b
	T2	97 ± 6.78 ^a	1.03 ± 0.48 ^{bdf}	1.1 ± 0.32 ^b	4.00 ± 0.01 ^b
<i>Parkinsonia aculeata</i>	T0	92 ± 8.74 ^{ac}	1.45 ± 0.74 ^{ad}	1.6 ± 0.70 ^{bcde}	4.04 ± 0.04 ^b
	T1	95 ± 8.22 ^a	1.88 ± 0.67 ^a	2.2 ± 0.42 ^{ac}	4.30 ± 0.06 ^a
	T2	92 ± 13.66 ^{ac}	1.52 ± 0.86 ^{ac}	2.7 ± 0.68 ^a	4.39 ± 0.02 ^a
<i>Leucaena leucocephala</i>	T0	40 ± 17.74 ^d	0.75 ± 1.06 ^{efgh}	2.8 ± 1.32 ^a	4.48 ± 0.05 ^a
	T1	44 ± 14.50 ^d	0.98 ± 1.28 ^{bdg}	2.2 ± 0.63 ^{ad}	4.29 ± 0.02 ^a
	T2	42 ± 16.26 ^d	0.83 ± 1.18 ^{efgh}	2.0 ± 0.47 ^{ae}	4.31 ± 0.02 ^a
<i>Albizia lebbeck</i>	T0	94 ± 5.16 ^a	0.91 ± 0.55 ^{bg}	1.0 ± 0.01 ^b	4.00 ± 0.01 ^b
	T1	77 ± 11.59 ^{bc}	0.90 ± 0.76 ^{bh}	1.0 ± 0.01 ^b	4.00 ± 0.01 ^b
	T2	75 ± 9.71 ^b	0.67 ± 0.74 ^{efgh}	1.1 ± 0.32 ^b	4.01 ± 0.02 ^b

Los datos representan la media de 10 repeticiones (n = 10) ± desviación estándar. Las letras diferentes en la columna indican diferencias significativas entre especies y tratamientos acorde con la prueba de Amva ($p \leq 0.05$). PG: porcentaje de germinación; TCR: tasa de crecimiento radicular; TMOG: tiempo modal de germinación; TMG: tiempo medio de germinación; T0: testigo; T1: extracto de suelo del sitio 1; T2: extracto de suelo del sitio 2; d: días.

CUADRO III. INDICADORES FITOTÓXICOS EVALUADOS EN LEGUMINOSAS EN SUELO DE LA LAGUNA LA ESCONDIDA, EN REYNOSA, TAMAULIPAS, MÉXICO.

Especies	Tratamiento	%		
		PGR	LRR	IG
<i>Neltuma glandulosa</i>	T1	95 ± 7.07 ^{ac}	100.00 ± 13.72 ^a	100.00 ± 18.81 ^a
	T2	96 ± 6.99 ^a	85.60 ± 19.03 ^{ad}	82.40 ± 20.29 ^{ad}
<i>Parkinsonia aculeata</i>	T1	95 ± 7.07 ^{ac}	96.88 ± 11.58 ^{ac}	92.67 ± 16.90 ^{ac}
	T2	92 ± 11.35 ^{ac}	77.12 ± 25.50 ^{bcd}	73.06 ± 29.76 ^{ac}
<i>Leucaena leucocephala</i>	T1	73.33 ± 23.83 ^{bcd}	60.63 ± 28.87 ^{bd}	50.23 ± 36.07 ^{bde}
	T2	69.99 ± 28.10 ^{bd}	51.24 ± 21.09 ^b	39.58 ± 23.12 ^{be}
<i>Albizia lebbbeck</i>	T1	85.57 ± 12.87 ^{ad}	75.92 ± 15.74 ^{bcd}	65.53 ± 19.55 ^{bde}
	T2	82.24 ± 13.03 ^{ad}	57.44 ± 23.75 ^{bd}	48.09 ± 23.36 ^{be}

Los datos representan la media de 10 repeticiones (n= 10) ± desviación estándar. Las letras diferentes en la columna indican diferencias significativas entre especies y tratamientos acorde con la prueba de Amva ($p \leq 0.05$). PGR: porcentaje de germinación relativo; LRR: longitud radicular relativa; IG: índice de germinación; T1: extracto de suelo del sitio 1; T2: extracto de suelo del sitio 2.

En el análisis de las variables evaluadas mediante el método de método de Zucconi (**Cuadro III**), las especies *Neltuma glandulosa* y *Parkinsonia aculeata* presentaron los valores más altos en PGR, LRR e IG, en comparación con *Leucaena leucocephala* y *Albizia lebbbeck*. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$), de acuerdo con el análisis multivariado (Amva) y la prueba lambda de Wilks. La PGR presentó valores del 92 ± 11.3 al $96 \% \pm 7.0$ para *N. glandulosa* y *P. aculeata*, respectivamente sin mostrar diferencias significativas entre los dos extractos de suelo evaluados, donde el T2 es el extracto de suelo con mayor concentración de EPT. La LRR representa la longitud radicular relativa, y mostró valores más altos en el T1 para todas las especies estudiadas; destacando *N. glandulosa* y *P. aculeata* con valores de 96.9 ± 11.6 al $100 \% \pm 13.7$ siendo diferentes estadísticamente ($p \leq 0.05$, Amva y Wilks) a *L. leucocephala* y *A. lebbbeck* (LRR = 60.6 ± 28.9 al $75.9 \% \pm 15.7$). El índice de germinación (IG) de las especies *N. glandulosa* y *P. aculeata* tuvo valores $> 80 \%$, es decir, una baja fitotoxicidad, de acuerdo con el método de Zucconi. Con respecto a las especies *L. leucocephala* y *A. lebbbeck* se obtuvieron valores $< 80 \%$, lo que indica una fitotoxicidad moderada o severa.

Las variables de suelo y germinación se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP) para indicar las relaciones entre las variables de germinación y los parámetros del suelo con las especies vegetales y tratamientos (sitios). El ACP de las variables analizadas mostró que los componentes Dim 1

(66.8 %) y Dim 2 (20.1 %) absorben el 86.9 % de la información de los datos (**Fig. 1**). Las variables con mayor peso factorial para la Dim 1 fueron As, Cd, Cr, Pb y CE con un valor de -0.99 y en la Dim 2 fue de 0.13. El peso factorial fue positivo (0.99) en la Dim 1 para las variables CIC, Corg, K, MO, Nt, P y pH; y para la Dim 2 presentaron un valor de -0.13. Todas las variables mostraron una contribución con un valor promedio del 5.80 % para las dimensiones Dim 1 y Dim 2 (**Fig. 1**). Para las especies vegetales evaluadas con el extracto acuoso del sitio 1 (T1) el pH, P, Nt, K, CIC, MO y Corg, presentaron una mayor incidencia (6.05 %) sobre los parámetros de germinación (PGR, IG, LRR y PG) en las plantas autóctonas *N. glandulosa* y *P. aculeata*. Por otro lado, en el extracto acuoso del sitio 2 (T2), la CE, Pb, Cd, Cr y As (6.05 % de contribución) influyeron negativamente en el desarrollo germinativo de las especies. Finalmente, los parámetros germinativos como indicadores de fitotoxicidad PGR, IG, LRR son más altos (contribución 5.90 %) en *N. glandulosa* y *P. aculeata* que en *A. lebbbeck* y *L. leucocephala*. Los tratamientos del sitio 1 (T1) y del sitio 2 (T2) fueron separados en dos grupos (**Fig. 2**) por la relación entre las variables.

DISCUSIÓN

Con base en los resultados los parámetros físicos y químicos influyeron en las variables de germinación, T2 es el sitio más tóxico para la germinación de las

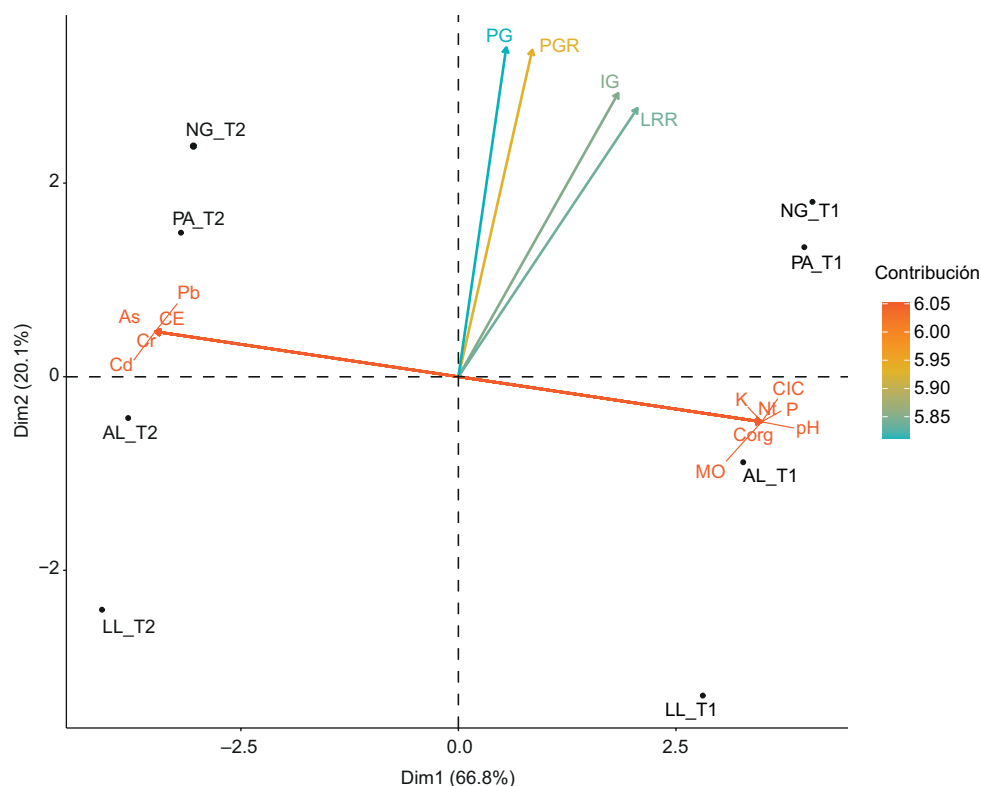


Fig. 1. Análisis de componentes principales (ACP) de variables de germinación y parámetros físicos y químicos del suelo. AL: *A. lebbbeck*; LL: *L. leucocephala*; PA: *P. aculeata*; NG: *N. glandulosa*; T1: extracto acuoso de suelo del sitio 1; T2: extracto acuoso de suelo del sitio 2; As: arsénico; Cd: aadmio; Cr: cromo; Pb: plomo; CE: conductividad eléctrica; PG: porcentaje de germinación; PGR: porcentaje de germinación relativo; LRR: longitud radicular relativa; IG: índice de germinación; C_{org.}: carbono orgánico; MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Nt: nitrógeno total; P: fósforo; K Int.: potasio intercambiable.

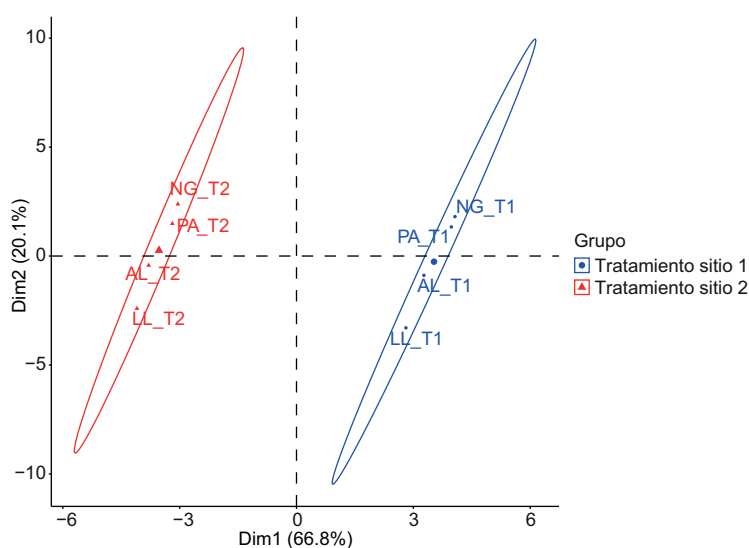


Fig. 2. Análisis de grupos de leguminosas evaluadas en extractos acuosos de suelos contaminados con EPT de la laguna La Escondida, en Reynosa, Tamaulipas, México. AL: *A. lebbbeck*; LL: *L. leucocephala*; PA: *P. aculeata*; NG: *N. glandulosa*; T1: extracto acuoso de suelo del sitio 1; T2: extracto acuoso de suelo del sitio 2.

plantas, por los altos valores de pH, CE y concentración de EPT. Se ha reportado que el pH influye en la movilidad de los metales pesados y que valores por encima de CE 1.5 mS/cm afectan el crecimiento de las plantas. En esta investigación un factor esencial en la fitotoxicidad fue el pH, debido a que afecta significativamente la disponibilidad de EPT en el suelo; los valores alcalinos de pH disminuyen la biodisponibilidad de elementos catiónicos (Thalassinios et al. 2023). Por otro lado, se ha reportado que en soluciones acuosas con extractos de Pb y Cd, los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As y Cr, que tienden a estar más disponibles a pH alcalino, como los reportados en esta investigación (7.7 y 7.3). Probablemente el incremento de los valores de pH puede provocar la formación de complejos organometálicos con Pb y Cd en la solución del suelo y no están biodisponibles para ser absorbidos por las raíces de las plantas, mientras que para el As y el Cr el pH favoreció la biodisponibilidad (Van Herreweghe et al. 2002, Olaniran et al. 2013). Es posible que la cubierta de la semilla de *L. leucocephala* y *A. lebbeck* contenga compuestos químicos que puedan afectar indirectamente su nivel de toxicidad (Thalassinios et al. 2023).

La MO y la textura limitan la biodisponibilidad de los EPT debido a la elevada área de superficie de los grupos funcionales que pueden desprotonarse (carboxílicos, hidroxilos, fenólicos y otros) que favorecen la adsorción de los EPT en el suelo (Strawn 2021). El porcentaje de MO en T2 la fue bajo (1.1 % $\pm$ 0.07), lo que limitó la adsorción de los EPT en el suelo favoreciendo su biodisponibilidad. La textura franco arcillo-arenosa se relaciona con una baja CIC, lo que disminuye la capacidad de amortiguamiento del suelo y, por lo tanto, con una menor adsorción de Pb y Cd. Además, la MO y la textura determinan la capacidad de retención de agua del suelo, lo cual a su vez afecta la disponibilidad de humedad para la semilla y la aireación del sustrato (Andra et al. 2006, Saminathan et al. 2010).

El sitio 2 (T2) se caracterizó por tener altos valores EPT de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales. *N. glandulosa* y *P. aculeata* presentaron mayor IG (73.06 - 100 %), PGR (92 - 95 %) y LRR (77.1 - 100 %), lo que indicó una mayor tolerancia a los EPT (**Cuadro III** y **Fig. 2**). Esto es ocasionado por variabilidad intraespecífica de *N. glandulosa* y *P. aculeata* que tuvieron mejores resultados que *L. leucocephala*. Debido a que *N. glandulosa* y *P. aculeata* son especies que crecen en el suelo de la laguna, es decir, se encuentran dentro de su distribución natural (Molina-Guerra et al. 2019), tienen

una mejor adaptación y una mayor probabilidad de germinación bajo las condiciones evaluadas. Por otro lado, *A. lebbeck* aunque tuvo un PG de 75 - 94 %, fue diferente estadísticamente, debido a que es una especie que no se encuentra en la laguna y por ende no tiene tolerancia a los EPT (Verma et al. 2013). Por lo tanto, se puede afirmar que esta especie presenta mayor sensibilidad a sustancias fitotóxicas sobre el crecimiento radicular.

Por otro lado, *N. glandulosa*, *P. aculeata*, *L. leucocephala* y *A. lebbeck* tienen como característica morfológica semillas con una cubierta dura, por lo que fue necesario recurrir a tratamientos pregerminativos para romper la dormancia de las semillas y acelerar la germinación de cada una de ellas (Kwakye y Blankson 2022).

En las pruebas PG, TCR, TMOG, TMG, un factor que contribuyó a la germinación de las cuatro especies fueron las características de fertilidad del suelo con respecto a Nt, P y K (**Cuadro I**). Estos macronutrientes son cruciales para la germinación de diversas especies de plantas y favorecen el desarrollo de las semillas (**Cuadro II**, **Fig. 1**). Además, de acuerdo con Mantilla (2008) la germinación de las semillas también depende de las condiciones externas como la composición del sustrato, en este caso del extracto acuoso y del contenido de humedad (Caputo-Suarez et al. 2020). Esto se debe a que la cantidad de agua que toma una semilla madura permite la elongación del embrión o de la radícula (Mantilla 2008). Los porcentajes de germinación por encima de 75 %, para todas semillas de las especies de estudio no se vieron influenciados por las concentraciones de los EPT como lo señalan Di Salvatore et al. (2008), quienes reportan que cuando hay importantes concentraciones de metales en el sustrato, estos pueden ser absorbidos por el tegumento, lo cual no afecta el crecimiento del embrión. Los parámetros utilizados para obtener el porcentaje de germinación, no precisamente significan crecimiento por división celular. En contraste, por ser más sensible que la germinación, el efecto de inhibición por metales es observado en la elongación radicular (Soudek et al. 2010). Asimismo, la composición química y la salinidad del agua que satura el extracto acuoso, influye en la germinación, ya que puede afectar la osmorregulación de la semilla y a su vez ser un factor fitotóxico.

En contraste con los resultados obtenidos en los indicadores fitotóxicos, González-Villalobos et al. (2021), señalan que la germinación de *P. aculeata* se ve afectada por la presencia de Pb, en soluciones a concentraciones de hasta 2.0 mM de PbCl₂ y Pb(NO₃)₂ con 82 y 74 % de germinación

respectivamente, mientras que en el presente estudio la germinación de *P. aculeata* fue mayor con PG y PGR > 92 % considerando que la concentración del extracto acuoso fue de 0.015 ppm Pb (dato no reportado en este estudio). Otro estudio hecho por Kabir et al. (2018), reporta que la germinación de *L. leucocephala* fue de 63.33 % en presencia de Pb y Cd en soluciones de $Pb(NO_3)_2$ y $Cd(NO_3)_2$ a 100 ppm; los autores concluyeron que tanto el Pb como el Cd producen efectos tóxicos sobre la germinación y crecimiento de esta especie, lo que respalda los resultados de este estudio es decir, a menores concentraciones de EPT el IG se ve afectado. en esta especie. Por otro lado, *L. leucocephala*, ha sido reportada por su capacidad de germinación (Shafiq et al. 2008), que va de 8 a 35 % en ambientes contaminados con Cd y Pb en soluciones acuosas (25 a 100 ppm), en donde presentan fitotoxicidad de baja a severa de acuerdo con los criterios de Zucconi. En esta investigación, *N. glandulosa* y *P. aculeata* presentaron un IG de 80 - 100 % lo que concuerda con lo reportado por Abbas et al. (2019), González-Mendoza et al. (2017), y González-Villalobos et al. (2021) quienes mencionan que estas especies son capaces de crecer en suelos contaminados con As, Cd y Pb.

N. glandulosa y *P. aculeata* presentaron índices de fitotoxicidad baja, mientras que *L. leucocephala* y *A. lebbeck* tuvieron una fitotoxicidad severa y moderada, respectivamente, de acuerdo con la clasificación de Zucconi et al. (1981). Esto debido a los efectos tóxicos de los EPT presentes en el T2 que ocasionaron la inhibición o retraso de la germinación (Kranter y Colville 2011, González-Villalobos et al. 2021).

Otro factor a considerar durante la germinación de *L. leucocephala* y *A. lebbeck* es la latencia o dormancia por su dura cubierta seminal (Utello et al. 2023, Ruiz-Carranza et al. 2024). En general el nivel de fitotoxicidad de los EPT depende de la biodisponibilidad del elemento específico, de la especie vegetal y de las propiedades físicas y químicas del suelo como pH, CE, MO (Antoniadis et al. 2019), y en algunos casos de la temperatura (Fernández et al. 2023). La temperatura no influyó debido a que se mantuvieron a un valor constante de 28 °C.

CONCLUSIONES

La variabilidad intraespecífica fue una condición para *N. glandulosa* y *P. aculeata* que influyó en la capacidad de germinación (IG del 73.06 al 100 %) y su tolerancia a EPT en comparación con *L. leucocephala* y *A. lebbeck* (IG de 39.58 % y 65.53 %);

por consiguiente, confiere un paso preliminar de tolerancia para usos de restauración y conservación en sitios degradados por EPT.

El pH, CIC, MO, N_t , P y K, humedad y textura influyen en los niveles de fitotoxicidad de los EPT en las variables de germinación de *N. glandulosa*, *P. aculeata*, *L. leucocephala* y *A. lebbeck*.

RECOMENDACIONES

La presencia de As, Cd, Cr y Pb en el suelo de la laguna, en donde la concentración del As es dos veces mayor a la establecida por la NOM-147 SEMARNAT-SSA1-2004 (22 mg kg⁻¹) (DOF 2007) representa un riesgo para la salud del suelo, para la conservación de la biodiversidad y para la salud humana por lo que se requiere adoptar nuevas estrategias y/o alternativas para la descontaminación del sitio. Asimismo, es conveniente que antes de iniciar un proceso de restauración, las especies vegetales seleccionadas sean evaluadas de acuerdo con su capacidad de germinación, bajo las condiciones del suelo contaminado; lo cual determinará su tolerancia y su contribución a la restauración del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la Beca de Maestría en Ciencias en Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales otorgada a Daniel Olivares Segura (No. de CVU 1318149). Agradecemos a la M. en C. Carol Meritxell Molina-Monteleón por el apoyo en el manejo y uso de la paquetería del *software* R versión 4.3.1 y a la Dra. María Cruz Juárez-Aragón por el apoyo técnico en el laboratorio.

REFERENCIAS

- Abbas A.M., Abd-Elmabod S.K., El-Ashry S.M., Soliman W.S., El-Tayeh N. y Castillo J.M. (2019). Capability of the invasive tree *Prosopis glandulosa* Torr. to remediate soil treated with sewage sludge. *Sustainability* 11 (9), 2711. <https://doi.org/10.3390/su11092711>
- Altonar-Gómez X.A., Tzintzun-Pedraza K.X., Osuna-Vallejo V. y Lindig-Cisneros R. (2021). Respuesta de plantas jóvenes de cuatro especies de coníferas a la exposición al mercurio. *Madera y Bosques* 27 (3), e2732160. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732160>

- Andra S.S., Sarkar D., Datta R. y Saminathan S. (2006). Lead in soils in paint contaminated residential sites at San Antonio, Texas, and Baltimore, Maryland. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 77 (5), 643-650. <https://doi.org/10.1007/s00128-006-1111-y>
- Antoniadis V., Shaheen S.M., Levizou E., Shahid M., Niazi N.K., Vithanage M., Ok Y.S., Bolan N. y Rinklebe J.A. (2019). Critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? —A review. *Environment International* 27, 819-847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>
- Argentel-Martínez L., Peñuelas-Rubio O., González-Aguilera J., Soto-Gonzales H.H. y Torres-Velázquez J.R. (2022). Escarificación química y mecánica de semillas *Parkinsonia aculeata* L. SP.Pl. y su efecto en la absorción de agua y germinación. *Avanços nas Ciências Florestais* 3, 40-49. <https://doi.org/10.46420/9786581460655cap4>
- Argota-Pérez G., González-Pérez Y., Argota-Coello H., Fimia-Duarte R. y Iannacone-Oliver J. (2012). Desarrollo y bioacumulación de metales pesados en *Gambusia punctata* (Poeciliidae) ante los efectos de la contaminación acuática. *Revista Electrónica Veterinaria* 13 (5), 1-12.
- Bakewell-Stone P. (2023). *Leucaena leucocephala* (leucaena). En: CABI Compendium. CABI International, inter-governmental, Wallingford, Reino Unido. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.3163417/11/2024>
- Bhat S.A., Bashir O., Haq S.A.U., Amin T., Rafiq A., Ali M., Américo-Pinheiro J.H.P. y Sher F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere* 303, 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Caputo-Suarez C.P., Codó P.C. y Peton A. (2020). Bioquímica de la germinación de semillas. En: Fundamentos de bioquímica aplicada a las ciencias agropecuarias y ambientales. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, pp. 203-224.
- Carbó L.I., Volpe S.M., Gutiérrez G., Herrero M.A. y Gil S.B. (2023). Último recuento: una estrategia efectiva para la evaluación de indicadores de germinación en especies forrajeras en situaciones de estrés. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 24(2), e2894 https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2894
- Carroza I.E., Boiardi J.L. y Gatti M.N. (2020). Biogas y compost a partir de residuos. *Actas de Jornadas y Eventos Académicos de la Universidad Tecnológica Nacional* 5, 1-6. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.753.2020>
- Cavazos-Castillo G.A. (2021). Reynosa como ciudad fronteriza: su dinámica, identidad y procesos históricos. *Antropología. Revista Interdisciplinaria del Instituto Nacional de Antropología e Historia* 7, 72-88.
- Chan-Quijano J.G., Cach-Pérez M.J. y López-Mejía M. (2021). Especies vegetales con uso potencial en la remediación de zonas contaminadas en México. *Revista Forestal del Perú* 36 (1), 22-46. <https://doi.org/10.21704/rfp.v1i36.1703>
- Covarrubias S.A. y Peña-Cabriales J.J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33, 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Dachung G., Amonum J.I., Chenge I.B. y Adeka P. (2023). Effect of acid pretreatment of seeds on the germination and early growth of *Albizia lebbek* (L) Benth in Makurdi, Benue State-Nigeria. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry* 9 (3), 27-35. <https://doi.org/10.9734/ajraf/2023/v9i3203>
- Di Salvatore M., Carafa A.M. y Carratù G. (2008). Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates. *Chemosphere* 73, 1461-1464.
- DOF (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. *Diario Oficial de la Federación*. México. México. 26 de abril de 2006.
- Duarte-Zaragoza V.M., Pérez-Hernández V.S., Hernández-Acosta E. y Villanueva-Morales A. (2020). Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7 (2), e2311. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2311>
- Everitt B. y Hothorn T. (2011). An introduction to applied multivariate analysis with R. Springer, Nueva York, NY, EUA, 289 pp.
- Fernández Y.A., Ahmed L.Q., Calero C.A M. y Marrero D.F. (2023). Efecto de la temperatura y la luz en la germinación de semillas de dos leguminosas. *Universidad & Ciencia* 12 (2), 163-175.
- GOBTAM y SEA (2014). Programa de Manejo del Área Natural Protegida Parque Estatal Laguna La Escondida. Ciudad Victoria, Tamaulipas. Gobierno del Estado de Tamaulipas y Servicios Ambientales S.A. de C.V. México. pp. 120.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R. y Sánchez-López A.S. (2017). Definiciones y problemática en la investigación científica en aspectos de

- fitorremediación de suelos. *Revista Agroproductividad* 10 (4), 3-7.
- González-Dávila R.P., Ventura-Houle R., de la Garza-Requena F.R. y Heyer-Rodríguez L. (2019). Caracterización fisicoquímica del agua de la laguna La Vega Escondida, Tampico, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10 (1), 1-29. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-01>
- González-Mendoza D., Méndez-Trujillo V., Grimaldo-Juárez O., Ceceña-Duran C., Tzintzun-Camacho O., Gutiérrez-Miceli, F., Sánchez-Viveros G. y Aviles-Marin M. (2017). *Changes of photochemical efficiency and epidermal polyphenols content of Prosopis glandulosa and Prosopis juliflora leaves exposed to cadmium and copper. Open Life Sciences* 12 (1), 373-378. <https://doi.org/10.1515/biol-2017-0043>**
- González-Villalobos M.A., Martínez-Trinidad T., Alarcón A. y Plascencia-Escalante F. O. (2021). Toxicidad del plomo en la germinación y el crecimiento de plántulas de *Parkinsonia aculeata* L. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12 (66), 199-208. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.886>
- Gutiérrez-Jaime L., Reyna-Salazar K., Cota-Peimbert C., Sosa-Ureña B., López-Romero C.A. y Torres-Bugarín O. (2024). Repercusiones y riesgos de salud debidos a la exposición al arsénico. *Medicina Interna de México* 40 (6), 356-364.
- Guzmán-Castro V., Razo-Zárate R., Vázquez-Cuevas G.M. y Hernández-Juárez M. (2022). Factores que condicionan la empleabilidad de las plantas en fitorremediación. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería* 10 (19), 42-49.
- Herrera J.A. y Lombardi A. (2021). Introductory approach to eco-hydrological urbanism: The adaptive reuse of PEMEX former refinery in Reynosa, Mexico. *International Journal of Environmental Impacts* 4 (1), 1-13. <https://doi.org/10.2495/EI-V4-N1-1-13>
- Hooker W.J. (1842). *The London journal of botany*. Vol. 3. Hyppolyte Bailliere Publisher. Londres, Reino Unido, 666 pp.
- Huslina F., Khudur, L.S., Shah K., Surapaneni A., Netherway P. y Ball A.S. (2024). Mine site restoration: The phytoremediation of arsenic-contaminated soils. *Environments* 11 (5), 99. <https://doi.org/10.3390/environments11050099>
- Iannacone J., Torres-Zeballos U., Castañeda-Pérez L., Minaya D., Alvaríño L., Cárdenas-Callirgos J., Argota-Pérez G., Rodríguez-Santiago A. y Wetzel E. (2024). Predictores de la ecología parasitaria de *Centrocestus formosanus* (Trematoda: Heterophyidae) en *Melanoides tuberculata* (Caenogastropoda: Thiaridae) en un humedal costero, Lima, Perú. *Revistas de Investigaciones Veterinarias del Perú* 5 (5), e29257. <https://doi.org/10.15381/rivep.v35i5>
- Illescas-Gallegos E., Rodríguez-Trejo D.A., Villanueva-Morales A., Borja-de La Rosa M.A., Ordóñez-Candelaria V.R. y Ortega-Aragón L.A. (2021). Factors influencing physical dormancy and its elimination in two legumes genus. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 27 (3), 413-429. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.06.041>
- ISO (1995). Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia. International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza, 6 pp.
- Kabir M., Iqbal M.Z., Shafiq M. y Farooqi R. (2018). The effects of lead and cadmium individually and in combinations on germination and seedling growth of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences* 43 (1), 33-43.
- Kassambara A. (2017a). Multivariate analysis I, practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning [en línea] <https://xsluulab.github.io/Workshop/2021/wee10/r-cluster-book.pdf> 14/03/2025
- Kassambara A. (2017b). Multivariate analysis II, practical guide to principal component methods in R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra (Vol. 2) [en línea] <https://vdoc.pub/documents/multivariate-analysis-ii-practical-guide-to-principal-component-methods-in-r-mn1c7814ul40.pdf> 14/03/2025
- Kranner I. y Colville L. (2011). Metals and seeds: biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany* 72 (1), 93-105. <http://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.005>
- Kaiser H.F. (1961). A note on Guttman's lower bound for the number of common factors. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 14, 1-2.
- Kwakyé J. y Blankson S.S. (2022). Effect of seed pre-sowing treatments on the germination and early growth of *Albizia lebbek* seeds. *Journal of Applied Life Sciences and Environment* 54 (3), 342-353. <http://doi.org/10.46909/journalalse-2021-030>
- López-Hernández M.E. y Morales-Hernández O.E. (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 12 (2), 15-28.
- Mantilla A.J. (2008). Desarrollo y germinación de las semillas. En: *Fundamentos de fisiología vegetal* (J. Azcón-Bieto y M. Talón Eds.) 2a ed, McGraw Hill. Madrid, España, pp.1-21.
- Molina-Guerra V. M., Mora-Olivo A., Alanís-Rodríguez E., Soto-Mata B. y Patiño-Flores A.M. (2019). Plantas características del matorral espinoso tamaulipeco

- en México. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México, 114 pp.
- Nelson D.N. y Sommers L.E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Chemical and microbiological properties. Methods of soil analysis: Part 2. (A.L. Page, Ed.), American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Wisconsin, EUA, pp 539-579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Noguez-Inesta A., López-Sánchez A.S., Carrillo-González R. y González-Chávez M. C.A. (2017). Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación. Revista Agro productividad 10 (4), 57-62.
- Ochoa-Ochoa L., Urbina-Cardona J.N., Vázquez L. B., Flores-Villela G. y Bezaury-Creel J. (2009). The effects of governmental protected areas and social initiatives for land protection on the conservation of Mexican amphibians. PLOS ONE 4 (9), e6878. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006878>
- Olaniran A.O., Balgobind A. y Pillay B. (2013). Bioavailability of heavy metals in soil: Impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. International Journal of Molecular Sciences 14 (5), 10197-228. <https://doi.org/10.3390/ijms140510197>
- Pabón S.E., Benítez R., Sarria-Villa R.A. y Gallo J.A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Entre Ciencia e Ingeniería 14 (27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Pouresmaeli M., Ataei M., Forouzandeh P., Azizollahi P. y Mahmoudifard M. (2022). Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. Journal of Environmental Chemical Engineering 10 (5), 108482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108482>
- Ranal M.A. y Santana D.G.D. (2006). How and why to measure the germination process? Revista Brasil. Botânica 29 (1), 1-11.
- Reino J., Sánchez J.A., Muñoz B., González Y. y Montejo L. (2011). Efecto combinado de la escarificación y la temperatura en la germinación de semillas de leguminosas herbáceas. Pastos y Forrajes 34 (2), 179-184.
- Ruiz-Carranza L.D., Sigala-Rodríguez J.A., Alanís-Rodríguez E., Molina-Guerra V. M. y Basave-Villalobos E. (2024). Tratamientos que promueven la germinación de semillas de cinco especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco con latencia física. Polibotánica (58), 159-170. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.11>
- Saminathan S.K., Sarkar D., Andra S.S. y Datta R. (2010). Lead fractionation and bioaccessibility in contaminated soils with variable chemical properties. Chemical Speciation and Bioavailability 22 (4), 215-225. <http://doi.org/10.3184/095422910X12892425424203>
- Sánchez J., Estrada-Castillón E., García-Aranda M.A., Duarte-Hernández M.F., García-González F., Valenzuela-Núñez L.M. y Muro-Pérez G. (2023). Los ambientes áridos y semiáridos: su relación con la dispersión y germinación de especies. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 14 (75), 35-67. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1288>
- Sánchez-Puente Z.C., Chacón-Hernández J.C., Alarcón A., Rocandio-Rodríguez M. y Mora-Ravelo S.G. (2020). Germinación y bioestimulación en *Acacia farnesiana* (L.) Willd y *Ebenopsis ebano* (Berl.) Barneby para la remoción de As, Cd y Zn de lodos residuales por extracción de gas shale en Tamaulipas. Nova Scientia 12 (25), 1-22. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2184>
- Sanz-Elorza M., Dana-Sánchez E. D. y Sobrino-Vesperinas S. (2004). Atlas de las plantas alóctonas invasoras en España. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, España, 384 pp.
- Shafiq M., Iqbal M.Z. y Mohammad A. (2008). Effect of lead and cadmium on germination and seedling growth of *Leucaena leucocephala*. Journal of Applied Sciences and Environmental Management 12 (2), 61-66.
- Soares Bichoff R., Nogueira de Albuquerque A., de Cinque M.D, Shigueru O.R., Silva O.R., Ferreira de Oliveira N.C., Matos V de J., Silva P.A.J., Nascimento A.J.D., Correia S.D. y Farias V.G. (2018). Overcoming seed dormancy and evaluation of viability in *Leucaena leucocephala*. Australian Journal of Crop Science 12 (01), 168-172. <http://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.01.pne908>
- Soudek P., Katrusáková A., Sedláček L., Petrová S., Koci V., Marsik P., Griga M. y Vaněk T. (2010). Effect of heavy metals on inhibition of root elongation in 23 cultivars of flax (*Linum usitatissimum* L). Archives of Environmental Contamination and Toxicology 59, 194-203.
- Strawn D.G. (2021). Sorption mechanisms of chemicals in soils. Soil Systems 5, 13. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010013>
- Thalassinou G., Petropoulos S.A., Grammenou A. y Antoniadis V. (2023). Potentially toxic elements: A review on their soil behavior and plant attenuation mechanisms against their toxicity. Agriculture 13, 1684. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091684>
- Torres R.C. y Renison D. (2020). Capacidad germinativa y longevidad en semillas de dos especies arbóreas nativas del bosque serrano en el centro argentino. Quebracho 28 (1), 54-61.
- Utello M.J., Tarico J.C., Demaestri M.A. y Plevich J.O. (2023). Evaluación de tratamientos pregerminativos en semillas de *Prosopis caldenia*. Bosque 44 (1), 37-45. <http://doi.org/10.4067/s0717-92002023000100037>

- Van Herreweghe S., Swennen R., Cappuyns V. y Vandecasteele C. (2002). Chemical associations of heavy metals and metalloids in contaminated soils near former ore treatment plants: a differentiated approach with emphasis on pH_{stat} – leaching. *Journal of Geochemical Exploration* 76 (2), 113-138. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00232-7](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00232-7)
- Vargas T.V., Hernández R., E. M., Gutiérrez L.J., Plácido D.C.J. y Jiménez C.A. (2007). Clasificación climática del estado de Tamaulipas, México. *CienciaUAT* 2 (2), 15-19.
- Varnero M.T., Rojas C. y Orellana R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7 (1), 28-37.
- Vázquez-Yanes C., Batis- Muñoz A.I., Alcocer Silva M.I., Gual-Díaz M. y Sánchez- Dirzo C. (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte Técnico. Proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. CdMx, México, 13 pp.
- Verma S.C., Vashishth E., Singh R., Kumari A., Meena A. K., Pant P., Bhuyan G.C. y Padhi M. M. (2013). A review on parts of *Albizia lebbeck* (L.) Benth used as ayurvedic drugs. *Research Journal of Pharmacy and Technology* 6 (11), 1307-1313.
- Wong-Argüelles C., Carranza-Álvarez C., Alonso-Castro A.J. y Ilizaliturri-Hernández C.A. (2021). Fitorremediación in situ en México: una Revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44 (2), 133-142. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.133>
- Zapata-González D.A., Trujillo-González J.M., Torres-Mora M.A., González-Santamaria D. y Jiménez-Ballesta R. (2023). Assessment of toxic response of *Lactuca sativa* to compost extracted from agri-food waste. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 13 (1), 1-9. <https://doi.org/10.57647/j.ijrowa.2024.1301.04>
- Zucconi F., Pera A., Forte M. y De Bertoli M. (1981). Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle* 22, 54-57.