

**Artículo original / Original article**

# Respuesta morfológica de *Hordeum vulgare* cv. La Molina 96 y *Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89 a diferentes concentraciones de borra petrolera

Morphological response of *Hordeum vulgare* cv. La Molina 96 and *Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89 to varying concentrations of petroleum sludge

Aldo Alberto Cabrera-Berrocal <sup>1\*</sup>; Ronald Rolando Mori-Pezo <sup>2</sup>; Pedro Mendoza-Tamani <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas, Yurimaguas, Perú

## RESUMEN

La contaminación de suelos agrícolas con residuos de petróleo representa una amenaza para el desarrollo vegetal y la productividad agroecológica. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta morfológica de la cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) y la quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89) frente a diferentes concentraciones de borra petrolera en el suelo. Se empleó un diseño completamente aleatorizado con seis tratamientos (0 %, 0.5 %, 1 %, 2 %, 4 % y 6 %) y tres repeticiones por tratamiento, bajo condiciones controladas. Se midieron variables morfofisiológicas como altura, número de hojas, longitud foliar, número de granos (en cebada) y área foliar estimada. Los resultados mostraron que ambos cultivos no germinaron a partir del 4 % de contaminación. La cebada presentó reducciones de hasta 81 % en altura y 84 % en área foliar con 2 % de borra. La quinua germinó en todos los tratamientos, aunque a 2 % su altura se redujo un 87 % y el número de hojas cayó un 90 %. Se concluye que la borra petrolera genera un efecto fitotóxico severo en ambas especies, siendo la quinua relativamente más tolerante, permitiendo sugerir su uso potencial en suelos contaminados o como especie bioindicadora.

**Palabras clave:** asfáltenos; bioindicadores; contaminación del suelo; fitotoxicidad; hidrocarburos pesados; tolerancia vegetal.

## ABSTRACT

The contamination of agricultural soils with petroleum residues poses a threat to plant development and agroecological productivity. This study aimed to evaluate the morphological response of barley (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) and quinoa (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89) to different concentrations of petroleum sludge in the soil. A completely randomized design was employed with six treatments (0 %, 0.5 %, 1 %, 2 %, 4 %, and 6 %) and three replicates per treatment under controlled conditions. Morphophysiological variables including plant height, number of leaves, leaf length, number of grains (in barley), and estimated leaf area were measured. The results showed that both crops failed to germinate from 4% contamination. Barley exhibited reductions of up to 81 % in height, and 84 % in leaf area at 2 % petroleum sludge. Quinoa germinated in all treatments; however, at 2%, its height was reduced by 87% and the number of leaves dropped by 90%. It is concluded that petroleum sludge causes severe phytotoxic effects in both species, with quinoa being relatively more tolerant. These findings suggest its potential use in contaminated soils or as a bioindicator species.

**Keywords:** asphaltenes; bioindicators; phytotoxicity; heavy hydrocarbons; soil contamination; plant tolerance.

**Cómo citar / Citation:** Cabrera Berrocal, A. A., Mori Pezo, R. R. & Mendoza Tamani, P. (2025). Respuesta morfológica de *Hordeum vulgare* cv. La Molina 96 y *Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89 a diferentes concentraciones de borra petrolera. *Revista Peruana de Investigación Agropecuaria*, 5(1), e124. <https://doi.org/10.56926/repia.v5i1.124>

Editor: Dr. Fred William Chu Koo 

**Recibido:** 28/08/2025

**Aceptado:** 01/04/2026

**Publicado:** 20/04/2026

\* [aldocabreraberrocal@gmail.com](mailto:aldocabreraberrocal@gmail.com) (autor de correspondencia)



© Authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo es un problema ambiental serio que afecta la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas (Barati et al., 2020). Los hidrocarburos de petróleo presentes en el suelo ejercen efectos fitotóxicos que pueden inhibir la germinación y disminuir significativamente la biomasa (Kamranifar et al., 2025; Khatibi & Hosseini, 2018). Rivera-Cruz & Trujillo-Narcía (2004) observaron, por ejemplo, que en suelos con concentraciones extremadamente altas de hidrocarburos de petróleo la producción de biomasa en la vegetación se redujo alrededor de un 50% en comparación con suelos con menor contaminación.

En el contexto normativo peruano, el Decreto Supremo No. 011-2017-MINAM un Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas de 3000 mg/kg respecto a la fracción F3, correspondiente a cadenas hidrocarbonadas de entre 28 a 40 átomos de carbono. Sin embargo, no se contempla un límite específico para hidrocarburos más pesados (mayores a C40), como los que suelen encontrarse en la borra petrolera. Esta omisión normativa deja un vacío importante en la gestión ambiental de suelos altamente contaminados, lo cual refuerza la necesidad de estudios que evalúen sus efectos sobre la biota vegetal.

Las borras, residuos pesados derivados del procesamiento del crudo, suelen contener grandes concentraciones de asfáltenos, compuestos altamente recalcitrantes y resistentes a la degradación biológica. Navas-Cáceres et al. (2023) señalan que los asfáltenos son la fracción más polar y pesada del petróleo, con estructura compleja y toxicidad elevada, lo que explica su persistencia en suelos contaminados y su resistencia al catabolismo microbiano. Estudios previos también confirman estas propiedades, al describir los asfáltenos como moléculas polarizadas, de alto peso molecular y difícil degradación (Chand et al., 2022; Kashi et al., 2018; Liao et al., 2009; Tavassoli et al., 2012). Además, se ha observado que, durante la biodegradación de suelos contaminados por petróleo, la proporción de asfáltenos aumenta porque otras fracciones más ligeras se eliminan primero, dejando los residuos más pesados (> C40) (Tavassoli et al., 2012).

La presencia de petróleo en el suelo puede interferir con la absorción de agua y nutrientes por las raíces, y causar estrés oxidativo en las plantas (Korshunova et al., 2021). En cebada (*Hordeum vulgare*), se ha reportado que la contaminación con crudo inhibe el crecimiento de raíces y brotes, reduce el tamaño de las hojas y disminuye el contenido de clorofila (Korshunova et al., 2021). Estos efectos resultan en plantas más pequeñas, cloróticas y de menor vigor en suelos contaminados con petróleo. Korshunova et al. (2021), documentaron que el ingreso de petróleo al suelo tuvo un efecto inhibitorio sobre la longitud y peso de raíces y tallos de plantas de cebada durante todo un experimento de campo, además de reducir el área foliar y el verdor de las hojas. Tales daños morfológicos reflejan la dificultad de muchas especies para establecerse en medios con contaminantes hidrocarbonados.

La fitorremediación ha emergido como una estrategia viable para rehabilitar suelos contaminados, aprovechando plantas capaces de tolerar y hasta degradar contaminantes orgánicos (Barati et al., 2020). Esto implica identificar especies vegetales resistentes que puedan crecer en presencia de residuos petroleros, contribuyendo a la degradación o estabilización de los hidrocarburos (Barati et al., 2020). Algunas gramíneas de ciclo corto, como la cebada y la avena, han mostrado mejorar la

biodegradación de hidrocarburos de petróleo en el suelo al estimular la actividad microbiana de la rizósfera, no obstante, la contaminación generalmente limita el crecimiento de estas plantas: Barati et al. (2020), reportaron disminuciones en la altura y la biomasa de cebada y avena a medida que aumentó el nivel de petróleo en el suelo. Es decir, aun las especies potencialmente útiles para fitorremediación sufren estrés bajo alta carga de contaminantes, lo cual puede reducir su eficacia.

Por otro lado, la quinua (*Chenopodium quinoa*) es un pseudocereal andino conocido por su notable tolerancia a condiciones adversas como alta salinidad, sequía y heladas (Abbas et al., 2023; Hinojosa et al., 2018; Pathan et al., 2023). Estudios recientes sugieren que la quinua también puede tolerar suelos contaminados con metales pesados y residuos de perforación petrolera, manteniendo un crecimiento relativamente estable donde otras especies sufren estrés severo (Amjad et al., 2022; Haseeb et al., 2022; Matías et al., 2024). Khalili et al. (2024) encontraron que la quinua mostró tolerancia excepcional y elevada capacidad de acumulación de metales en suelos con hasta 15% de recortes de perforación, en contraste con la cebada que presentó síntomas visibles de estrés bajo alta contaminación. Esta capacidad hace de la quinua una potencial candidata para la fitorremediación o como bioindicadora en ambientes contaminados con petróleo. Se ha documentado asimismo que, aunque la quinua es resistente, en condiciones de contaminación extremas su crecimiento y biomasa finalmente disminuyen considerablemente (Alharby et al., 2022); sin embargo, en niveles intermedios de estrés supera en rendimiento a muchos cultivos tradicionales. Sus mecanismos de tolerancia – similares a los de plantas halófitas – incluyen la exclusión o acumulación controlada de iones tóxicos y un robusto sistema antioxidante, lo que explicaría su desempeño superior en suelos degradados (Nikalje & Suprasanna, 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la respuesta morfológica de la cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) y la quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89) al crecimiento en un suelo contaminado con borra petrolera. Se plantea que el aumento de la concentración de borra petrolera en el suelo afectará negativamente el crecimiento y desarrollo morfológico de la cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) y la quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89), esperándose que la quinua presente mayor tolerancia a la contaminación por hidrocarburos pesados debido a sus mecanismos fisiológicos de resistencia al estrés.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Entorno y tipo de estudio

La investigación se llevó a cabo en los jardines de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), específicamente en el área ubicada frente a la Facultad de Ciencias. Se desarrolló como un estudio aplicado, de nivel explicativo y diseño experimental completamente aleatorizado, orientado a evaluar la respuesta morfológica de dos especies vegetales a diferentes concentraciones de contaminantes del suelo.

### Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. Los tratamientos consistieron en la mezcla de suelo con diferentes concentraciones

de borra petrolera: 0 % (testigo), 0.5 %, 1 %, 2 %, 4 % y 6 %. Las unidades experimentales estuvieron conformadas por macetas plásticas de 700 g de capacidad, conteniendo suelo tratado homogéneamente.

### Variables

Las variables dependientes fueron de tipo morfofisiológico, evaluadas de forma separada en cada especie vegetal:

Altura máxima (cm).

Longitud del último entrenudo (cm).

Número de hojas.

Longitud media de hojas inferiores – LMI (cm).

Longitud máxima de la hoja superior – LMS (cm).

Número de granos (en cebada).

Vigor inicial (cm<sup>2</sup> de área foliar estimada).

### Población y muestra

La muestra estuvo constituida por dos especies vegetales: cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) y quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89), desarrolladas por el Programa de Cereales de la UNALM. Se utilizaron 18 macetas por especie vegetal (6 tratamientos × 3 repeticiones), sumando un total de 36 unidades experimentales.

### Condiciones del suelo y mediciones

El suelo fue clasificado como franco arenoso, con fertilidad media. Las características físico-químicas se presentan en la **Tabla 1**. Las variables relacionadas con el vigor y el crecimiento se midieron al final del ciclo vegetativo. El área foliar (vigor inicial) fue estimada con la fórmula propuesta por Isla Climente (1996):

$$\text{Área} = \text{Longitud} \times \text{Anchura máxima} \times 0.665$$

**Tabla 1.**

*Características iniciales del suelo utilizado en el experimento.*

Parámetro	Valor
pH	7.8
Conductividad eléctrica (1:1)	0.87 dS/m
CaCO <sub>3</sub> libre	2.57 %
Materia orgánica	1.3 %
Fósforo disponible	2.2 ppm
Nitrógeno total	0.04 %
Potasio disponible	96 ppm
Textura	64 % arena, 14 % arcilla, 22 % limo
Punto de marchitez	0.10 cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup>

Capacidad de campo	0.21 cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente	1.51 g/cm <sup>3</sup>
Densidad real	2.65 g/cm <sup>3</sup>
Porosidad	0.43 cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup>
Agua disponible	0.10 cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup>

### Preparación de los tratamientos

La borra petrolera, proveniente de la refinería de Conchán (Lima, Perú), fue mezclada homogéneamente con el suelo antes de la siembra. La determinación de la concentración real de hidrocarburos en las mezclas se realizó mediante extracción en equipo Soxhlet, utilizando éter etílico como solvente. Posteriormente, se evaporó el solvente y se pesó el residuo hasta alcanzar peso constante.

Durante el experimento no se aplicaron técnicas de biorremediación activa (volteos o aireación). Se mantuvo la humedad cerca de capacidad de campo con riegos diarios. No se aplicaron fertilizantes adicionales para evitar sesgos en el efecto de la borra.

### Técnicas de recolección de datos

Las mediciones se realizaron manualmente con regla milimetrada y calibradores. Las variables se registraron en hojas de campo diseñadas para el experimento. Las plántulas se observaron hasta completar el ciclo vegetativo o hasta la interrupción del desarrollo por efectos del contaminante.

### Análisis estadístico

Los datos se procesaron utilizando el software RStudio versión 4.2.2. Se aplicó estadística descriptiva (media  $\pm$  error estándar) para cada tratamiento, con el fin de resumir las tendencias centrales y la variabilidad de las variables morfofisiológicas evaluadas en cebada y quinua.

Para analizar la relación entre la concentración de borra petrolera y las variables morfofisiológicas, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y su correspondiente coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se consideró una correlación significativa cuando  $|r| \geq 0.80$  y  $R^2 > 0.65$ , lo que indica una asociación fuerte entre las variables.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Desarrollo de la cebada

La **Tabla 2** muestra el comportamiento de las variables morfofisiológicas en plantas de *Hordeum vulgare* cv. La Molina 96 bajo diferentes concentraciones de borra petrolera. Las variables evaluadas fueron altura máxima, longitud del último entrenudo, número de granos y vigor inicial. Las plantas no germinaron en concentraciones de 4 % y 6 %, por lo que se excluyeron de la medición de dichas variables.

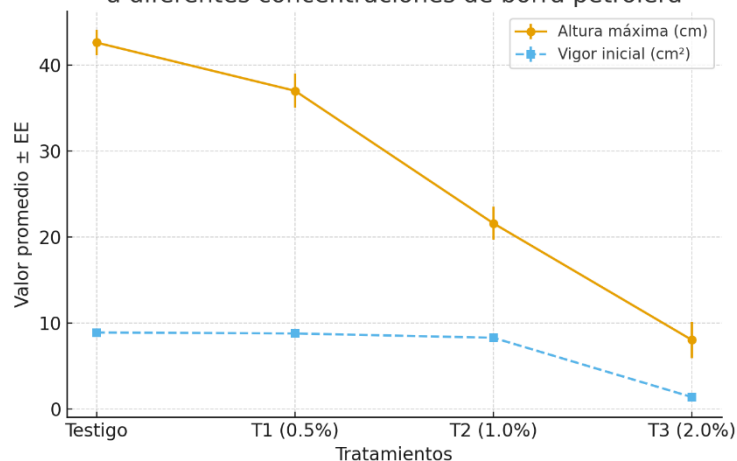
**Tabla 2.**

*Variables morfofisiológicas en cebada (Hordeum vulgare cv. La Molina 96) expuesta a borra petrolera.*

Tratamiento	Altura máxima (cm)	Último entrenudo (cm)	Número de granos	Vigor inicial (cm <sup>2</sup> )
Testigo	42.6 $\pm$ 1.5	9.0 $\pm$ 0.2	4	8.91 $\pm$ 0.1

<b>T1 (0.5 %)</b>	37.0 ± 2.0	9.3 ± 0.3	4	8.80 ± 0.3
<b>T2 (1.0 %)</b>	21.6 ± 1.9	–	–	8.30 ± 0.1
<b>T3 (2.0 %)</b>	8.05 ± 2.1	–	–	1.41 ± 0.2
<b>r</b>	-0.985	–	–	-0.908

Respuesta morfológica de cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) a diferentes concentraciones de borra petrolera



**Figura 1.** Variación de la altura máxima y el vigor inicial de *Hordeum vulgare* cv. La Molina 96 en función de la concentración de borra petrolera

Los datos mostraron una disminución progresiva de altura y vigor inicial conforme aumentó la concentración de borra. La correlación de Pearson entre la concentración de contaminante y las variables altura máxima y vigor inicial fue negativa y fuerte ( $r = -0.985$  y  $-0.908$ , respectivamente).

Los resultados muestran que la borra petrolera ejerce un efecto fitotóxico severo sobre la cebada, afectando la germinación, el crecimiento y la reproducción. A concentraciones de 4 % y 6 %, las plantas no germinaron, evidenciando un umbral de toxicidad crítica, en línea con lo observado por Kamranifar et al. (2025) en especies halófitas expuestas a hidrocarburos.

La altura máxima disminuyó significativamente con la concentración del contaminante ( $r = -0.985$ ), confirmando una fuerte relación negativa. Este patrón coincide con los efectos inhibitorios descritos por Korshunova et al. (2021), quienes observaron reducciones similares en cebada expuesta a petróleo.

El número de granos y el último entrenudo se vieron afectados en los tratamientos más contaminados, reflejando una interrupción del ciclo reproductivo por estrés ambiental, como reportaron Rivera-Cruz & Trujillo-Narcía (2004).

El vigor inicial (área foliar estimada) también cayó drásticamente ( $r = -0.908$ ), lo cual sugiere daño al aparato fotosintético por estrés oxidativo, respaldado por Alharby et al. (2022) estudios con quinua y metales pesados.

### 3.2. Desarrollo de la quinua

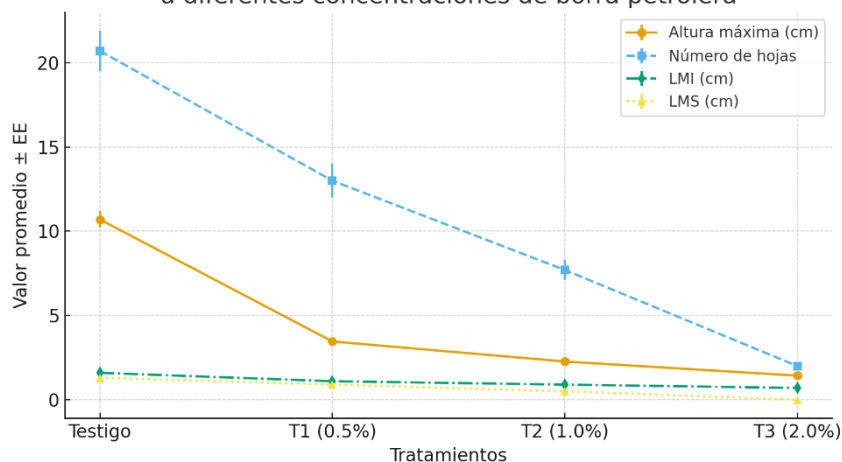
La quinua presentó germinación inicial en todos los tratamientos, aunque las plantas no sobrevivieron en concentraciones de 4 % y 6 %. En la **Tabla 3** se presentan los resultados de las variables morfofisiológicas evaluadas: altura máxima, número de hojas, longitud media de hojas inferiores y longitud máxima de hojas superiores.

**Tabla 3.**

*Variabes morfofisiológicas en quinua (Chenopodium quinoa cv. La Molina 89) expuesta a borra petrolera.*

Tratamiento	Altura máxima (cm)	Número de hojas	LMI (cm)	LMS (cm)
Testigo	10.7 ± 0.5	20.7 ± 1.2	1.6 ± 0.1	1.3 ± 0.1
T1 (0.5 %)	3.46 ± 0.1	13.0 ± 1.0	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1
T2 (1.0 %)	2.27 ± 0.1	7.7 ± 0.6	0.9 ± 0.1	0.5 ± 0.1
T3 (2.0 %)	1.43 ± 0.1	2.0 ± 0.0	0.7 ± 0.0	–
<i>r</i>	-0.807	-0.970	-0.922	-0.992
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.652	0.941	0.941	0.983

Respuesta morfológica de quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89) a diferentes concentraciones de borra petrolera



**Figura 2.** Efecto de la borra petrolera sobre la altura, número de hojas y longitud foliar de la quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89)

Todas las variables evaluadas en quinua mostraron correlaciones inversas con la concentración de borra. La longitud máxima de la hoja superior presentó una correlación casi perfecta ( $r = -0.992$ ;  $R^2 = 0.983$ ), lo que confirma su sensibilidad como indicador de estrés fisiológico.

A diferencia de la cebada, la quinua fue capaz de germinar y desarrollarse parcialmente en todos los tratamientos, lo que respalda su tolerancia relativa a contaminantes orgánicos (Amjad et al., 2022; Haseeb et al., 2022; Matías et al., 2024). Sin embargo, los resultados de este estudio demuestran que la borra petrolera afecta significativamente su desarrollo morfológico, y que variables como el número de hojas y la longitud de hoja superior son buenos indicadores de daño fisiológico. La disminución del área foliar compromete directamente la fotosíntesis y el desarrollo general de la planta, como se ha documentado en otras especies bajo estrés por hidrocarburos (Kamranifar et al., 2025). Este patrón general de disminución concuerda con estudios como el de Alharby et al. (2022), que documentaron que la quinua reduce el tamaño foliar y la producción de biomasa bajo estrés por metales pesados, aunque mantiene cierta integridad estructural gracias a mecanismos antioxidantes y de exclusión iónica. En este estudio, la quinua toleró mejor las concentraciones bajas (0.5 %) manteniendo su morfología relativamente estable, pero en concentraciones de 1.0 % a 2.0 % la afectación fue severa.

Estos hallazgos coinciden con lo descrito por Navas-Cáceres et al. (2023), quienes afirman que los hidrocarburos pesados como los asfáltenos afectan el crecimiento vegetativo al alterar la fisiología celular y el equilibrio hormonal en plantas.

## CONCLUSIONES

El estudio demuestra que la borra petrolera genera un efecto fitotóxico progresivo sobre el desarrollo morfológico de la cebada y la quinua, afectando variables clave como la germinación, el crecimiento vegetativo y el vigor inicial. La cebada (*Hordeum vulgare* cv. La Molina 96) muestra una alta sensibilidad a la contaminación, con interrupción del desarrollo desde concentraciones iguales o superiores al 1 %, mientras que la quinua (*Chenopodium quinoa* cv. La Molina 89) presenta una tolerancia relativa mayor, especialmente en niveles bajos de borra petrolera.

Estos resultados aportan evidencia útil para programas de gestión y monitoreo de suelos contaminados con residuos de petróleo. La quinua puede considerarse como una especie bioindicadora de tolerancia intermedia, útil para identificar niveles moderados de contaminación, mientras que la cebada puede emplearse como indicadora sensible en estudios de toxicidad. La selección de estas especies podría incorporarse en estrategias de fitorremediación pasiva o revegetación inicial de suelos degradados, contribuyendo a la recuperación ecológica y productiva en áreas afectadas por la industria petrolera.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar investigaciones complementarias orientadas a evaluar los mecanismos fisiológicos de tolerancia en quinua, así como ensayos a mayor escala que incluyan interacciones con microorganismos rizosféricos o el uso de enmiendas para mejorar la biorremediación. Estas acciones permitirían profundizar en el manejo sostenible de suelos contaminados y optimizar el uso de especies nativas y adaptadas en programas de recuperación ambiental.

El estudio se realizó bajo condiciones controladas en macetas, lo que limita la extrapolación directa a condiciones de campo. No se evaluaron parámetros fisiológicos (por ejemplo, contenido de clorofila, peroxidación lipídica o actividad antioxidante) que podrían explicar con mayor detalle los mecanismos de tolerancia observados.

Se recomienda realizar estudios complementarios que integren mediciones bioquímicas y microbiológicas, así como ensayos de campo con diferentes tipos de suelos y cultivares locales para validar la aplicabilidad de la quinua como especie bioindicadora.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por permitir desarrollar esta investigación en su campus.

## FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron ningún patrocinio para llevar a cabo el presente estudio.

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Concepción y elaboración del manuscrito: Cabrera-Berrocal, A.A, Mendoza-Tamani, P.

Recogida de datos: Cabrera-Berrocal, A.A., Mori-Pezo, R.R.

Análisis de datos: Cabrera-Berrocal, A.A, Mendoza-Tamani, P.

Discusión de resultados: Cabrera-Berrocal, A.A, Mendoza-Tamani, P.

Revisión y aprobación: Cabrera-Berrocal, A.A, Mori-Pezo, R.R.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, G., Areej, F., Asad, S. A., Saqib, M., Anwar-ul-Haq, M., Afzal, S., Murtaza, B., Amjad, M., Naeem, M. A., Akram, M., Akhtar, N., Aftab, M., & Siddique, K. H. M. (2023). Differential Effect of Heat Stress on Drought and Salt Tolerance Potential of Quinoa Genotypes: A Physiological and Biochemical Investigation. *Plants*, *12*(4), 774. <https://doi.org/10.3390/plants12040774>
- Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., & Abbas, G. (2022). Potassium and Silicon Synergistically Increase Cadmium and Lead Tolerance and Phytostabilization by Quinoa through Modulation of Physiological and Biochemical Attributes. *Toxics*, *10*(4), 169. <https://doi.org/10.3390/toxics10040169>
- Amjad, M., Iqbal, M. M., Abbas, G., Farooq, A. B. U., Naeem, M. A., Imran, M., Murtaza, B., Nadeem, M., & Jacobsen, S.-E. (2022). Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and its implications for phytoremediation and human health. *Environmental Geochemistry and Health*, *44*(5), 1487–1500. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0>
- Barati, M., Safarzadeh, S., Mowla, D., & Bakhtiari, F. (2020). Effect of Barley and Oat Plants on Phytoremediation of Petroleum Polluted Soils. *Pollution*, *6*(4), 695–703. <https://doi.org/https://doi.org/10.22059/poll.2020.297258.746>
- Chand, P., Dutta, S., & Mukherji, S. (2022). Slurry phase biodegradation of heavy oily sludge and evidence of asphaltene biotransformation. *Journal of Environmental Management*, *324*, 116315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116315>
- Haseeb, M., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Saddiq, M. S., Zahra, N., Raza, A., Lbrahim, M. U., Iqbal, J., Kamran, M., Ali, Q., Javed, T., Ali, H. M., & Siddiqui, M. H. (2022). Phytoremediation of nickel by quinoa: Morphological and physiological response. *PLOS ONE*, *17*(1), e0262309. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262309>
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., & Murphy, K. M. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, *7*(4), 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
- Isla Climente, R. (1996). *Efecto de la salinidad sobre la cebada (Hordeum vulgare L.). Análisis de caracteres morfo-fisiológicos y su relación con la tolerancia a la salinidad* [Universitat de Lleida]. <http://hdl.handle.net/10803/8324>
- Kamranifar, M., Pourzamani, H., Khosravi, R., Ranjbar, G., & Ebrahimpour, K. (2025). Phytotoxic

- effects of petroleum hydrocarbons on germination and growth of the native halophyte *Salicornia sinus persica* in oil contaminated soil. *Scientific Reports*, *15*(1), 8459. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92512-9>
- Kashi, M. H., Tabatabaee, M. S., & Soleimani, N. A. (2018). Biodegradation of the Most Heavier Fraction of Crude Oil, Asphaltene, by *Bacillus toyonensis* BCT-7112. *Journal of Chemical Health Risks*, *8*(1). <https://jchr.org/index.php/JCHR/article/view/87>
- Khalili, P., Hoodaji, M., Nadoushan, M. A., & Chamani, A. (2024). Assessing some Cereals and Quinoa as Bioindicators and Phytoextractors of Heavy Metals in Soils Contaminated with Drill Cutting Waste. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*(2), 3631–3648. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01782-1>
- Khatibi, S., & Hosseini, H. M. (2018). Assessment of Certain Plant Species degrading Total Petroleum Hydrocarbons in Contaminated Soil. *Grassroots Journal of Natural Resources*, *1*(1), 69–82. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.01017>
- Korshunova, T. Y., Vysotskaya, L. B., Arkhipova, T. N., Kuzina, E. V., Rafikova, G. F., Chetverikova, D. V., Bakaeva, M. D., & Chetverikov, S. P. (2021). Morphological and physiological-biochemical response of plants to treatment with hydrocarbon bacteria on the background of oil contamination. *ĖKOBIOTEH*, *4*(2), 72–80. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-2-72-80>
- Liao, Y., Geng, A., & Huang, H. (2009). The influence of biodegradation on resins and asphaltenes in the Liaohe Basin. *Organic Geochemistry*, *40*(3), 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.12.006>
- Matías, J., Cruz, V., Rodríguez, M. J., Calvo, P., Maestro-Gaitán, I., & Reguera, M. (2024). Evaluating Yield, Nutritional Quality, and Environmental Impact of Quinoa Straws across Mediterranean Water Environments. *Plants*, *13*(6), 751. <https://doi.org/10.3390/plants13060751>
- Navas-Cáceres, O. D., Parada, M., & Zafra, G. (2023). Development of a highly tolerant bacterial consortium for asphaltene biodegradation in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(59), 123439–123451. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30682-7>
- Nikalje, G. C., & Suprasanna, P. (2018). Coping With Metal Toxicity – Cues From Halophytes. *Frontiers in Plant Science*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00777>
- Pathan, S., Ndunguru, G., Clark, K., & Ayele, A. G. (2023). Yield and nutritional responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes to irrigated, rainfed, and drought-stress environments. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1242187>
- Rivera-Cruz, M. del C., & Trujillo-Narcía, A. (2004). Estudio de toxicidad vegetal en suelos con petróleos nuevo e intemperizado. *Interciencia*, *29*(7). [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442004000700007](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442004000700007)
- Tavassoli, T., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., & Salehizadeh, H. (2012). Asphaltene biodegradation using microorganisms isolated from oil samples. *Fuel*, *93*, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.021>