



BIOABSORCIÓN DE METALES PESADOS DE AGUA RESIDUALES CON BIOESTIMULANTES Y SUSTRATOS POR *SECHIUM EDULE SW*

BIOABSORPTION OF HEAVY METALS FROM WASTE WATER WITH BIOSTIMULANTS AND SUBSTRATES BY *SECHIUM EDULE SW*

Mario Francisco Santoyo de la Cruz¹

Abel Quevedo Nolasco²

Cándido Mendoza Peres³

Juan Enrique Rubiños Panta⁴

^{1,2,3,4}Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Estado de México, México

¹santoyo.mario@colpos.mx <https://orcid.org/0000-0002-8239-428X>

²anolasco@colpos.mx <https://orcid.org/0000-0003-3303-5077>

³mendoza.candido@colpos.mx <https://orcid.org/0000-0003-4358-036X>

⁴jerpkiye@colpos.mx <https://orcid.org/0000-0002-9788-0280>

(Recibido/received: 27-septiembre-2024; aceptado/accepted: 09-diciembre-2024)

RESUMEN: La contaminación de suelos y aguas representa un problema serio. Una alternativa eficiente es la fitorremediación, un método que utiliza plantas para limpiar contaminantes del suelo y el agua. Este enfoque es sostenible y menos invasivo que los métodos tradicionales. Los bioestimulantes, son sustancias o microorganismos que mejoran la absorción y asimilación de nutrientes. El objetivo de este estudio fue analizar la bioabsorción de metales pesados provenientes de la presa Endhó y la respuesta agronómica de *Sechium edule Sw* con bioestimulantes y dos tipos de sustratos. Para ello, se germinaron frutos de *Sechium edule Sw* y se sembraron en tinas maceteras de 100 L con sustratos de tezontle (fino y grueso) y lombricomposta en una proporción de 8:2 v/v, bajo un diseño experimental 1x3x2. El riego se realizó según las necesidades hídricas del cultivo, empleando agua de pozo durante la primera etapa y agua residual de la presa Endhó en la segunda. Además, se aplicaron tres tipos de bioestimulantes vegetales. Los resultados mostraron que las raíces del tratamiento B presentaron diferencias significativas en las concentraciones de cromo y plomo ($p = 0.0067$), mientras que en las hojas se observaron concentraciones significativas de cromo y arsénico en el mismo tratamiento ($p = 0.0018$). Se concluye que el tratamiento B, junto con el uso de bioestimulantes, representa una alternativa viable y sostenible para la bioabsorción de metales con *Sechium edule Sw*.

PALABRAS CLAVE: Fitohormonas; fitorremediación; lombricomposta; tratamiento biológico; variables agronómicas

ABSTRACT: Soil and water pollution is a serious problem. An efficient alternative is phytoremediation, a method that uses plants to clean contaminants from soil and water. This approach is sustainable and less invasive than traditional methods. Biostimulants, on the other hand, are substances or microorganisms that improve the absorption and assimilation of nutrients. The objective of this study was to analyze the bioabsorption of heavy metals from the Endhó dam and the agronomic response of *Sechium edule* Sw with biostimulants and two types of substrates. To do this, *Sechium edule* Sw fruits were germinated and planted in 100 L pots with tezontle substrates (fine and coarse) and vermicompost in a ratio of 8:2 v/v, under a 1x3x2 experimental design. Irrigation was carried out according to the water needs of the crop, using well water during the first stage and wastewater from the Endhó dam in the second. In addition, three types of plant biostimulants were applied. The results showed that the roots of treatment B presented significant differences in the concentrations of chromium and lead ($p = 0.0067$), while significant concentrations of chromium and arsenic were observed in the leaves in the same treatment ($p = 0.0018$). It is concluded that treatment B, together with the use of biostimulants, represents a viable and sustainable alternative for the bioabsorption of metals with *Sechium edule* Sw.

KEYWORDS: Agronomic variables; biological treatment; phytohormones; phytoremediation; vermicompost

INTRODUCCIÓN

La fitorremediación es un método que permite limpiar los contaminantes del suelo y agua. Donde las plantas absorben y transforman los contaminantes en sustancias menos tóxicas. La capacidad de las plantas para absorber metales pesados varía según la especie. Los metales pesados, que no se descomponen fácilmente, pueden acumularse en las plantas y tener efectos negativos a largo plazo en el medio ambiente y los organismos (Sepúlveda et al. 2023).

El Valle del Mezquital se encuentra en el sudoeste del estado de Hidalgo. Esta región, se sitúa en lo alto de la meseta mexicana, tiene una superficie de 5045 km², un pendiente promedio del 15.8%, y una altitud de 2040 metros sobre el nivel del mar (Chamizo et al. 2018). El agua residual que se genera en la Ciudad de México, se drena hacia el estado de Hidalgo, en su recorrido, parte del agua se vierte en la presa de Endhó, mientras otra parte se desvía hacia canales de riego para irrigar cultivos (Pérez et al. 2019). El estudio realizado por Martínez et al. (2022) caracterizó la problemática ambiental en torno a la dotación de áreas verdes, abordando aspectos relacionados con la contaminación de la presa. Se identificaron contaminantes como cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y cadmio (Cd) en las aguas vertidas a la presa, así como en el aire y el suelo circundante. Esta contaminación está estrechamente vinculada a la alta concentración de actividades industriales en la región. Se ha observado que el riego agrícola con aguas residuales de la presa Endhó influye en el contenido de metales pesados en el suelo. El cobre (Cu) muestra una alta concentración en los horizontes superiores del suelo. El cadmio (Cd) y el zinc (Zn) también tienen concentraciones significativas en los dos horizontes superficiales

del perfil del suelo. Las concentraciones de manganeso (Mn) son consistentes a lo largo del perfil del suelo. La materia orgánica y el limo están más asociados con las concentraciones de cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn), mientras que el carbonato de calcio (CaCO₃) está más relacionado con el cadmio (Cd) en estos suelos (Flores et al. 1992).

Una alternativa orgánica para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas es el uso de bioestimulantes. Estos se definen como sustancias o microorganismos que, al ser aplicados a las plantas, mejoran la absorción y asimilación de nutrientes, aumentan la tolerancia al estrés o mejoran las características agronómicas (Héctor et al. 2020). Los principales grupos de bioestimulantes son extractos de algas, proteínas hidrolizadas (péptidos y aminoácidos libres), y sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) (Martínez et al. 2022).

En la revisión realizada por Caballero (2022), se analizó evidencia que respalda el uso de bioestimulantes como una estrategia de pre acondicionamiento para mejorar el desempeño de las plantas utilizadas en procesos de fitorremediación. Los bioestimulantes, debido a sus propiedades multifuncionales, favorecen respuestas positivas en las plantas, el fortalecimiento del sistema radicular, la optimización del metabolismo, las interacciones beneficiosas con los microorganismos de la rizósfera y la regulación de mecanismos de tolerancia al estrés provocado por contaminantes.

La lombricomposta utiliza lombrices de tierra y microorganismos para transformar el estiércol del ganado en abono orgánico que contiene macro y micro nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Además, contribuye a restablecer las cadenas tróficas a través de la biota edáfica que se desarrolla, y bioestimulan los procesos internos (Ramos et al. 2019).

El chayote (*Sechium edule* Sw) pertenece al grupo *Sycioideae* de la familia *Curcubitaceae* que se caracteriza por poseer una semilla de gran tamaño. Contiene carbohidratos, proteínas, calcio, fósforo, hierro, vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina, ácido ascórbico, azúcar soluble y agua. Planta herbácea perenne, monoica (ambos sexos) trepadora, nativa de centro de América (Cruz, 2017).

La posibilidad de aprovechar como sustrato hortícola la diversidad de materiales disponibles en el entorno, está supeditada al buen conocimiento de sus propiedades, con el fin aplicar y adoptar técnicas de manejo pertinentes. Hay una preocupación por llegar a acuerdos sobre los criterios y métodos que permitan normalizar y homogeneizar la caracterización de los sustratos en horticultura (Flores, 2011). Por lo anterior, el objetivo fue analizar el efecto de la bioabsorción de metales pesados de aguas residuales por la raíz y hojas de *Sechium edule* Sw y las variables agronómicas en dos sustratos y el uso de los bioestimulantes, como una alternativa a la descontaminación de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron frutos de la planta *Sechium edule* Sw (Chayote), las cuales se sembraron directamente en las tinas maceteras de 100 L.

Se tamizó el tezontle en dos tipos de mallas: una gruesa de 6 mm (tratamiento A, TA) y otra de 2 mm (tratamiento B, TB). Este tezontle se colocó en diferentes tinas de plástico junto con la lombricomposta en una proporción 8:2 v/v (tezontle: lombricomposta con *Eisenia foetida*). Además, se incluyó un control (suelo, sin lombricomposta y bioestimulantes). El diseño experimental fue factorial, que consistió en una especie vegetal, tres bioestimulantes, dos tipos de sustratos con lombricomposta (1x3x2) es decir seis tratamientos, con tres repeticiones, con 18 unidades experimentales. Siendo un diseño experimental univariado y factorial modificada. Se sembraron los frutos de chayote y a los 30 días se trasplantaron en las tinas maceteras.

Para el riego se estimó las necesidades de agua con base en el método de Allen (1998) a partir de datos históricos de lugar para el cultivo de *Sechium edule* Sw en condiciones de invernadero en la zona de experimentación, que fue en el municipio de Texcoco estado de México, se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Cálculo de necesidades de riego para el cultivo de *Sechium edule* Sw.

Días	Etapa	Duración de etapa (días)	ET ₀ (mm/etapa)	K _c	ET _c (mm/etapa)	Acumulado por días	Necesidad de riego (L)	Densidad siembra / ha	Requerimiento de riego (L) por planta
25	Inicial	25	120	0.7	3.36	84	33600	588	57.14
55	Desarrollo	30	117	0.7	2.73	81.9	27300	588	46.42
90	Fruto	35	101	0.7	2.03	71.2	20300	588	34.52
145	Cosecha	55	159	0.7	2.03	111.3	20300	588	34.52
160	Final	15	42	0.7	1.97	29.6	19700	588	33.5
5.3 meses									Σ=206 L/planta

ET_c= Necesidad hídrica (mm/día); ET₀= Evapotranspiración del cultivo (mm/día) y K_c= Coeficiente del cultivo.

Para estimar la evapotranspiración (ET) un buen uso de los recursos hídricos, que facilita la planificación del riego. En las ecuaciones 1, 2 y 3 se presenta la E_{Tc} es la evapotranspiración del cultivo (mm/etapa); E_{T0} es la evapotranspiración de referencia (mm/etapa) y K_c es el coeficiente del cultivo (adimensional), que depende del estado fenológico (Liu and Luo, 2010).

$$\text{Cálculo de evapotranspiración: } E_{Tc} = (E_{T0} * K_c) / (\text{Duración de etapa}) \quad (1)$$

$$\text{Necesidad hídrica: } E_{Tc} * 1000 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$\text{Requerimiento de riego: } (\text{Necesidad hídrica}) / (\text{Densidad de siembra}) \quad (3)$$

En la primera etapa: el agua de riego fue obtenida del pozo y se utilizó como riego al momento de trasplante. En la segunda etapa: que fue a los 30 días de trasplante se regó con aguas residuales hasta los 60 días de trasplante. Las aguas residuales fueron recolectadas en garrafones de 20 L de la presa Endhó ayuntamiento de Tepetitlán y Tula en Hidalgo, este almacenamiento de agua es conocido por sus elevadas concentraciones de metales pesados.

Los bioestimulantes que se añadieron a las plantas fueron:

1.- Rootindol 3000 (marca Agronortech) Es un enraizador líquido que contiene (ácido indol butírico, ácido indol 3 butírico, ácido indol acético, ácido naftalenacético y ácido fúlvico; auxinas; citoquininas, giberelinas y triptófano). Se aplicó en la zona radicular con bomba de aspersión manual cada dos días durante dos semanas, en la parte radical y foliar en dosis de 8 mL de producto diluido en 1000 mL de agua.

2.- Freeamin (marca Agronortech) es un promotor líquido del crecimiento vegetal que contiene (aminoácido, ácidos fúlvicos y húmicos, diluyentes orgánicos y acondicionadores). Este producto se aplicó cada cinco días, en la etapa de desarrollo en el área foliar con bomba de aspersión manual en dosis de 8 mL de producto diluido en 1000 mL de agua.

3.- Super hormonal (marca Agronortech) es un promotor del crecimiento vegetal líquido que contiene (citoquininas, auxinas, giberelinas y ácidos fúlvicos). Este producto se aplicó cada cuatro días, durante de la floración en el área foliar con bomba de aspersión manual en dosis de 8 mL de producto diluido en 1000 mL de agua.

Las variables agronómicas se midieron en dos fechas: a los 30 días después de la primera irrigación con aguas residuales (30 de junio del 2023) y a los 60 días de riego con aguas residuales (30 de agosto del 2023), se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2. Variables agronómicas que se midieron en dos etapas

<i>Variables agronómicas</i>	<i>Instrumentos para la recolección de la información</i>	<i>Primera evaluación (a los 30 días de riego residual)</i>	<i>Segunda evaluación (a los 60 días de riego residual)</i>
1. Altura de planta	Cinta métrica (cm)	✓	✓
2. Diámetro de tallo	Vernier calibrador (cm)	✓	✓
3. Número de hojas	Conteo visual	✓	✓
4. Clorofila	(SPAD) Konica Minolta en hojas	✓	✓
5. Biomasa fresca aérea	Balanza digital (g)		✓
6. Biomasa seca aérea			✓
7. Longitud de raíz	Cinta métrica (cm)		✓
8. Volumen radical	Por desplazamiento de volumen en la probeta de 100 mL		✓

En la segunda evaluación se colectaron muestras de raíz y hoja para el análisis de metales pesados. Las cuales se secaron en un horno de secado a 60 °C para obtener materia seca. Las muestras de materia seca se utilizaron para determinar la concentración de los metales pesados (arsénico, plomo, cromo, níquel y cadmio) con los siguientes métodos: digestión con HNO₃/H₂O₂ y en horno de microondas; cuantificación con espectrofotómetro de emisión óptica y acoplado a plasma; espectrofotómetro de absorción atómica AIN-E-025; espectrofotómetro de emisión óptica acoplado a plasma AIN-E-004 y horno de microondas AIN-E-008. Se tomó un litro de agua residual de la presa Endhó para determinar los siguientes parámetros con sus respectivos métodos: metales pesados (plomo, cromo, cadmio, níquel y arsénico): cuantificación en espectrofotómetro de emisión óptica acoplado a plasma, según la NOM 021-SEMARNAT-2000.

Los resultados de las variables agronómicas se analizaron para conocer que tratamiento fue mejor (sustrato fino o grueso), con la prueba ANOVA univariado y factorial, con nivel del 95% de confianza ($\alpha=0.05$). Las rutinas de cálculo se realizaron con el software estadístico Statgraphics 18.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultado de bioabsorción de metales pesados

Las raíces de TB muestran diferencias significativas en la concentración de algunos metales pesados (plomo y cromo), en comparación con TA. En particular, las raíces de TB contienen 2.1 mg/kg más de plomo y 1.9 mg/kg más de cromo que las raíces de TA. Sin embargo, no se observan diferencias significativas en todos los metales analizados, ya que los niveles de arsénico, cadmio y níquel presentan variaciones mínimas entre TA y TB.

En la tabla 3 se presentan los resultados del análisis de metales pesados en las partes vegetales.

Tabla 3. Análisis de metales pesados en partes vegetales *Sechium edule* Sw y agua residual.

Muestra	Plomo (Pb)	Cromo (Cr)	Cadmio (Cd)	Níquel (Ni)	Arsénico (As)
mg Kg ⁻¹					
Raíz TA	2.2	0.5	0.1	1.6	0.3
Raíz TB	4.3*	2.4*	0.1	1.3	0.5
Raíz Control	2.8	1.2	0.1	1.4	1
Hoja TA	0.2	0.1	ND	0.3	0.2
Hoja TB	ND	4.05*	ND	0.2	3.5*
Hoja Control	ND	0.1	ND	0.1	ND
mg L ⁻¹					
Agua residual	0.10	0.03	0.04	0.12	0.02

TA= Tratamiento con sustrato fino; TB= Tratamiento con sustrato grueso; ND= No Detectable; *Existe diferencia estadística significativa, debido a que el valor P de la prueba F es menor al valor de alfa=0.05.

En el trabajo de Cartaya et al. (2017), encontraron que la aplicación del bioestimulantes (oligogalacturónidos) tuvo un efecto positivo en el aumento de la concentración de cobre tanto en las raíces como en la parte aérea de las plantas de *Solanum Lycopersicum* L. Las plantas cultivadas en suelo contaminado y tratadas con este producto mostraron niveles más altos de metales en sus órganos. De manera similar se observa en este trabajo, el incremento de bioabsorción con el uso de los tres productos bioestimulantes.

Las hojas del TB muestran diferencias significativas en la concentración de cromo (4.05 mg/kg) y arsénico (3.5 mg/kg), destacándose en la bioabsorción de estos metales pesados, en contraste, los niveles de plomo y cadmio son no detectables y el níquel es muy bajo. Por otro lado, TA en las hojas presenta niveles bajos de todos los metales analizados.

El TB mostró mejor bioabsorción de metales pesados debido a varios factores: la mayor superficie específica del tezontle fino permite más área de contacto para la absorción de nutrientes y metales; la lombricomposta enriquece el sustrato con materia orgánica y microorganismos que favorecen la solubilización de metales; la retención de humedad en el tezontle fino es superior, facilitando la actividad de las raíces; y el sustrato más fino crea un entorno óptimo para el crecimiento y expansión del sistema radicular, mejorando la bioabsorción. En sustratos más gruesos la disponibilidad de oxígeno favoreció el crecimiento radical, sin embargo, con altos porcentajes de aireación la falta de humedad puede afectar el crecimiento de raíces, que es lo que ocurrió con el TA (González et al., 2016).

El uso de bioestimulantes con ácidos húmicos y fúlvicos ha demostrado aumentar el tamaño de las hojas en plántulas de cacao, mejorando la absorción de nutrientes (Rodríguez et al. 2023). Este incremento en la absorción de nutrientes también facilita la bioabsorción de metales, como se ha observado en este estudio. La mayor superficie foliar y la mejora en la eficiencia de absorción de nutrientes pueden contribuir a una mayor capacidad de las plantas para acumular metales, lo que es especialmente relevante en contextos de fitorremediación y mejoramiento de suelos contaminados.

Analizando la muestra de agua recolectada se determinaron concentraciones bajas de metales pesados, por lo que, con riego frecuente de estas aguas se acumula en los sustratos de la maceta en donde las raíces absorben los metales pesados y los translocan en la parte aérea de la planta como se ha mencionado anteriormente en la tabla 3.

Efecto en las variables agronómicas

Altura de la planta

No se encontraron diferencias significativas en la altura de planta de *Sechium edule* Sw entre los tratamientos A y B a los 30 y 60 días de riego residual. Sin embargo, el tratamiento A numéricamente mostró mejores resultados en términos de altura de planta, con 233 cm a los 30 días y 510 cm a los 60 días, indicando una tendencia positiva, aunque no significativa en comparación con el tratamiento B, (Figura 2 y 3).

Falcón et al. (2021), demostraron que los resultados eficientes con el uso de bioestimulantes a base de quitosano que ha mostrado ser una estrategia prometedora para mejorar el crecimiento de plantas de tomate. Se aplicó quitosano en una concentración de 1 g L⁻¹, y como sustrato humus de lombriz, lo que resultó en incrementos notables del 30% en la altura de las plantas. Este resultado indica que la bioestimulación mediante quitosano y el humus de lombriz genera una respuesta fisiológica positiva en el desarrollo de las plantas.

Diámetro del tallo

En este estudio el diámetro del tallo, se encontró diferencias significativas entre los tratamientos A y B en ambas fechas de medición. Sin embargo, es relevante destacar que, en la primera fecha de medición, el tratamiento A presentó un mayor diámetro del tallo, alcanzando 1.03 cm, lo que sugiere una tendencia inicial a favor de este tratamiento, (figura 2 y 3).

Santana et al. (2016) reportaron que, aunque no hubo diferencias significativas, las medias del diámetro del tallo de plántulas de tomate, fueron superiores con el uso de los bioestimulantes y uso de sustrato de turba lo que sugiere un estímulo en el crecimiento celular. Este aspecto resalta la potencialidad de los bioestimulantes para mejorar ciertos parámetros del crecimiento vegetal, aun cuando las diferencias no sean estadísticamente significativas.

Número de hojas

En este estudio, se observaron diferencias significativas en el número de hojas entre los tratamientos en ambas fechas de medición. En la primera fecha, el tratamiento A destacó por su mejor desempeño, y esta tendencia se mantuvo en la segunda fecha de medición, donde nuevamente se registraron diferencias significativas en todos los tratamientos, siendo el tratamiento A el más efectivo, (figuras 2 y 3).

Estos hallazgos coinciden con los resultados de Moreno et al. (2021), quienes también encontraron diferencias significativas en el número de hojas con la aplicación de un bioestimulante elaborado con giberelinas, auxinas, citoquininas, aminoácidos, extracto de algas y brasinoesteroides en *Vanilla tahitensis* y sustrato compuesto por 50 % de serrín de balsa, 25 % de mantillo de huerta y 25 % de humus de lombriz. En su estudio, a los 90 y 210 días después del trasplante, los tratamientos con bioestimulantes y el uso de esos sustratos mostraron diferencias estadísticamente significativas en comparación con el tratamiento control.

Clorofila

En la medición de clorofila SPAD, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos A y B en ambas fechas de medición. En la primera fecha, el tratamiento B mostró un valor superior de 61 SPAD, mientras que, en la segunda fecha, el tratamiento A destacó con un valor de 72 SPAD, (figura 2 y 3).

Estos resultados son similares a los del estudio de Cobeña et al. (2022), que reporta efectos favorables en el contenido de clorofila SPAD con la aplicación de bioestimulantes a base de vermicomposta, lixiviados de vermicomposta y microorganismos eficientes en un sustrato de suelo franco arenoso inceptisol, en (*Capsicum annuum* L.). Los efectos positivos observados pueden atribuirse a la presencia de sustancias con actividad biológica, como los ácidos húmicos y los reguladores del crecimiento, que mejoran el contenido relativo de clorofila SPAD.

Biomasa seca y fresca aérea

Los resultados obtenidos indican diferencias significativas en la biomasa seca aérea entre los tratamientos A y B en la segunda fecha de medición, con el tratamiento A, con 229 g. En contraste, la biomasa fresca aérea no mostró diferencias significativas en la misma fecha, aunque el tratamiento A presentó un valor mayor de 817 g, (figura 3). Estos hallazgos concuerdan con Valero et al. (2023), que demostraron los efectos positivos del bioestimulante (chalcona sintética) en el crecimiento de *Vigna unguiculata*, cultivada en suelo superficial fresco agrícola, especialmente en términos de incremento y acumulación de biomasa. Estos efectos pueden atribuirse a los mecanismos típicos de los agentes bioestimulantes, como la estimulación del metabolismo primario y la modulación de rutas biosintéticas de fitohormonas como las auxinas, que promueven el aumento de la biomasa seca y fresca, observaciones que coinciden con los resultados de esta investigación.

Volumen radical, longitud de raíz, peso fresco de raíz y biomasa seca de raíz

Los resultados obtenidos en la segunda fecha de medición revelaron diferencias significativas en el volumen radical entre los tratamientos A y B, con el tratamiento B mostrando un mayor volumen (343 mL). A pesar de que la longitud de raíz no presentó diferencias significativas, el tratamiento A mostró una mayor longitud (74 cm). En cuanto al peso fresco de raíz, hubo una diferencia significativa a favor del tratamiento B, que alcanzó 474 gramos. Asimismo, la biomasa seca de raíz también mostró diferencias significativas, con el tratamiento B obteniendo 57 g, (figura 1 y 3).

Los resultados son consistentes con los hallazgos reportados por Díaz et al. (2020), quienes observaron diferencias significativas en la biomasa seca de raíz de *Passiflora edulis* cuando se utilizaron bioestimulantes a base de quitosano, obteniendo 0.37 g de raíz seca y 29 cm de longitud de raíz. De manera similar, Juárez et al. (2020) destacaron que el uso de un sustrato con 90% de porosidad favoreció el desarrollo radicular en plántulas de fresa, logrando una longitud de raíz de 14.50 cm. Este efecto se atribuyó a las propiedades físicas y químicas del sustrato, como la alta porosidad (28.21%) y la retención de humedad (9.44%), que mejoraron la oxigenación de la raíz. En este estudio, el tratamiento B, mostró mejores resultados en la raíz, podría haber sido influenciado por condiciones similares que optimizaron el desarrollo radicular. Estos resultados subrayan la importancia de las características del sustrato y el uso de bioestimulantes en la promoción del crecimiento y desarrollo de las raíces.



Figura 1. Se muestran las raíces del TA= Tratamiento A; TB= Tratamiento B y el control

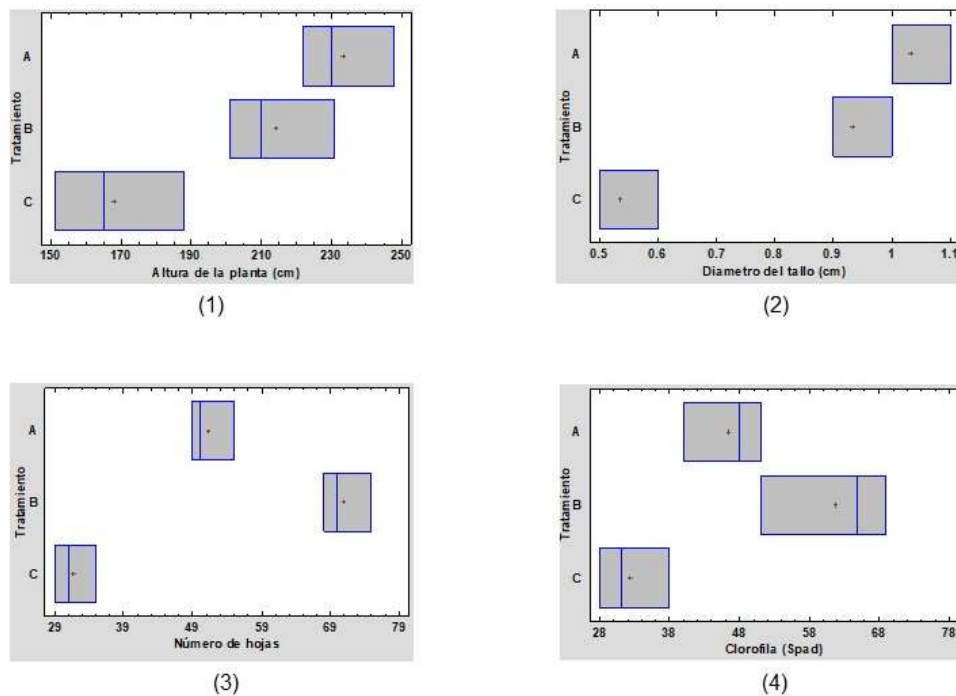


Figura 2. Efectos de los tratamientos A, B y control= C con respecto de las variables agronómicas a los 30 días de fruto de chayote y riego de agua residual: 1) Altura de planta $P= 0.0063$ (*A-C y *B-C); 2) Diámetro del tallo $P=0.0056$ (*A-C y *B-C); 3) Número de hojas $P=0.0018$ (*A-B, *A-C y *B-C) y 4) Clorofila $P= 0.0065$ (*B-C y *A-B). *Existe diferencia estadística significativa, debido a que el valor P de la prueba F es menor al valor de $\alpha=0.05$.

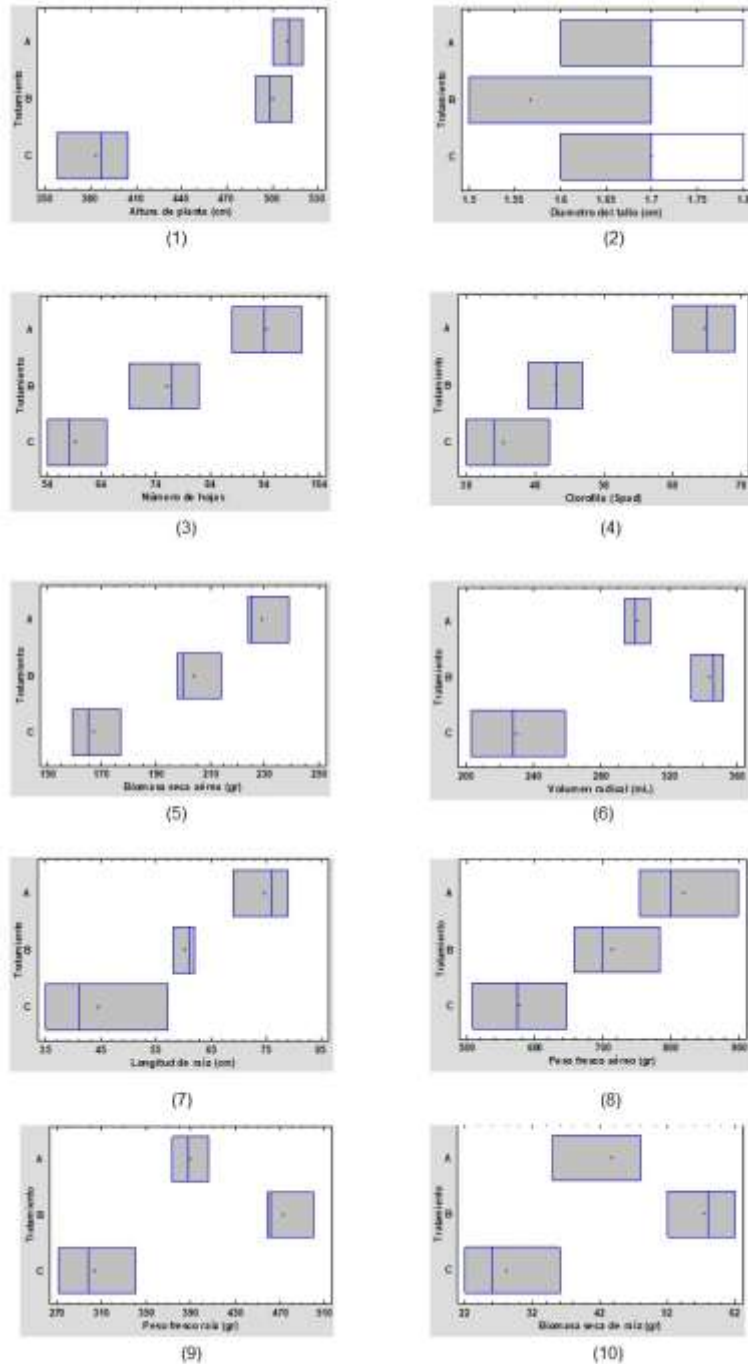


Figura 3. Efectos de los tratamientos A, B y Control= C con las variables agronómicas a los 60 días de fruto de chayote y riego de agua residual: 1) Altura de planta $P=0.0001$ (*A-C y *B-C); 2) Diámetro del tallo $P=0.2774$; 3) Número de hojas $P=0.0013$ (*A-B, *A-C y *B-C); 4) Clorofila $P=0.0009$ (*A-B y *A-C); 5) Biomasa seca aérea $P=0.0004$ (*A-B, *A-C y *B-C); 6) Volumen radical $P=0.0007$ (*A-B, *A-C y *B-C); 7) Longitud de raíz $P=0.0067$ (*A-C y *B-C); 8) Peso fresco aéreo $P=0.0153$ (*A-C); 9) Peso fresco de raíz $P=0.006$ (*A-B, *A-C y *B-C) y 10) Biomasa seca de raíz $P=0.0050$ (*A-B, *A-C y *B-C). *Existe diferencia estadística significativa, debido a que el valor P de la prueba F es menor al valor de $\alpha=0.05$.

La selección de bioestimulantes y sustratos se fundamenta en estudios que documentan su efecto positivo sobre el desarrollo de cultivos y la capacidad de absorción de metales pesados. En el caso de los bioestimulantes por etapa fenológica en el enraizamiento: El ácido indol butírico (IBA) y el ácido indol 3 butírico (IBA) promueven la formación de raíces adventicias, estimulando la división celular en la región del meristemo radicular. En el desarrollo vegetativo: Las giberelinas, citoquininas y el ácido fúlvico fomentan el alargamiento y división celular, además de mejorar la asimilación y la bioabsorción de nutrientes esenciales, lo que favorece un crecimiento vigoroso. Y en la floración y fructificación: El ácido naftalenacético (ANA), el triptófano y las giberelinas estimulan la inducción floral, el cuajado de frutos y la translocación de asimilados hacia los órganos reproductivos, contribuyendo a un mejor rendimiento. (Taiz et al., 2015; Khan et al., 2021). Por otro lado, el efecto del tezontle malla gruesa proporciona una mejor aireación y drenaje, aunque presenta una capacidad limitada para retener agua y nutrientes, mientras que la malla angosta favorece una mayor retención de humedad y nutrientes, aunque reduce la aireación. Esto permite analizar cómo la textura del sustrato influye en las propiedades físicas del medio de cultivo, impactando la bioabsorción de metales pesados y el desarrollo del cultivo. (Bhardwaj et al., 2021; Verhulst et al., 2011).

El diseño experimental factorial univariado modificado permite evaluar las interacciones entre una especie vegetal (*Sechium edule* Sw), dos tipos de sustratos con lombricomposta (en proporción 8:2 v/v) y el manejo con los bioestimulantes. Este diseño es robusto y permite obtener resultados confiables y extrapolables al analizar múltiples factores (1x3x2) y sus interacciones en 18 unidades experimentales. Por lo que se reduce la variabilidad experimental y mejora la precisión estadística. La elección del diseño y los tratamientos garantizan un análisis de las variables bajo estudio, con una base metodológica sólida y resultados interpretables.

Limitaciones e impacto en la generalización de los resultados

El uso de un diseño experimental en invernadero no permitió considerar las condiciones heterogéneas del campo. Además, el análisis se limitó a plomo, cromo, cadmio, níquel y arsénico dejando sin evaluar metales y metaloides comunes como el boro o cobre. Estas limitaciones restringen la extrapolación de los resultados a otras regiones agrícolas con diferentes composiciones de suelo, agua y niveles de contaminación.

Se recomienda realizar estudios *in situ* para evaluar la efectividad del uso de lombricomposta en suelos contaminados con múltiples metales y diferentes bioestimulantes. Además, sería valioso explorar la bioabsorción en variedades genéticamente mejoradas de *Sechium edule* Sw para incrementar la eficiencia de biorremediación.

CONCLUSIONES

Las raíces del chayote con el TB presentan diferencias significativas en la concentración de plomo y cromo en comparación con el TA. En las hojas de TB, se observan concentraciones significativas de cromo y arsénico, mientras que los niveles de plomo y cadmio son no detectables

y el níquel es muy bajo. En contraste, TA presenta niveles bajos de todos los metales en sus hojas.

Aunque no se encontraron diferencias significativas en algunos parámetros de las variables agronómicas como la altura de planta y el diámetro del tallo, el tratamiento A mostró tendencias positivas. En contraste, en el TB se destacó por un mayor volumen radical, el peso fresco de la raíz, clorofila y la biomasa seca de raíz. Hay efectos positivos de más crecimiento vegetal y bioabsorción de metales pesados por tener más retención de agua del sustrato fino, así como el uso de bioestimulantes, como una alternativa para la fitorremediación de suelos y agua.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCyT de México, por el apoyo financiero y al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, México, por el uso de sus instalaciones.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. <https://www.fao.org/4/X0490E/x0490e00.htm>
- Bhardwaj, A. K., Singh, R., Yadav, D. S., Sharma, P. K., y Shukla, S. (2021). Influence of Soil Texture and Organic Amendments on Nutrient Retention and Crop Productivity. *Agricultural Sciences*, 12(7), 635–652.
- Cartaya, O., Guridi, F., Cabrera, A., Moreno, A. M. y Hernández, Y. (2017). Efecto de la aplicación foliar de oligogalacturónidos a plántulas de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en la fitoextracción de cobre de suelo contaminado. *Cultivos Tropicales* 38 (3), 142-147. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000300020&lng=es&tlng=es
- Chamizo, C. S., Otazo, E. S., Gordillo, M. A. J., González, R. C. A., Suárez, S. J. y Muñoz, N. H. (2018). El cambio climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 5 (5), 40-51. <http://reibci.org/publicados/2018/oct/3000102.pdf>
- Cobeña, M. Y. L., Torres, G. A., Héctor, A. E. F., Fosado, T. O. y León, A. R. (2022). Efectos de bioestimulantes en las clorofilas y el número de hojas en el cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L.) en condiciones semiprotegidas. *La Técnica Edición Especial*, 15-26. DOI: https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.4096
- Cruz, V. R. (2017). Estudios científicos relacionados a la raíz tuberizada de chayote (*Sechium edule* Sw), revisión. *Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP*, 3 (5). <https://doi.org/10.29057/icap.v3i5.2061>
- Díaz, P. G., Rodríguez, Y. G. A., Montana, L., Miranda, S. T. C., Basso, C. y Arcia, M. M. A. (2020). Efecto de la aplicación de bioestimulantes y Trichoderma sobre el crecimiento en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* sims) en vivero. *Bioagro* 32 (3): 195-204. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7901981>

- Falcón, R. A. B., González, P. D., Nápoles, G. M. C., Morales, G. D. M., Núñez, V. M. C., Cartaya, R. O. E., Martínez, G. L., Terry, A. E., Costales, M. D., Dell, A. J. M., Jerez, M. E., González, G. L. G. y Jiménez, A. M. C. (2021). Oligosacarinas como bioestimulantes para la agricultura cubana. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* 11 (1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-01062021000100007&lng=es&tlng=es.
- Flores, D. L., Hernández, S. G., Alcalá, M. R. y Maples, V. M. (1992). Total, contents of cadmium, copper, manganese and zinc in agricultural soils irrigated with wastewater from Hidalgo, México. *Revista Contaminación Ambiental* 8 (1), 37-46. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/29310>
- Flores, R. V. J. (2011). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Primera edición, Bogotá, Colombia, 294p.
- González, F. J. A., Evans, R. Y., López, C. R., Benavides, M. A., y Cabrera, F. M. (2016). Las propiedades físicas del sustrato de crecimiento afectan el desarrollo de la fresa cultivar 'Albion'. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3607-3621.
- Héctor, A. E., Torres, G. A., Fosado, T. O., Peñarrieta, B. S., Solórzano, B. J., Jarre, M. V., Medranda, V. F., y Montoya, B. J. (2020). Influencia de bioestimulantes sobre el crecimiento y el rendimiento de cultivos de ciclo corto en Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales* 41 (4). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000400002&lng=es&tlng=es.
- Juárez, R. C. R., Aguilar, C. J. A., Bugarín, M. R., Aburto, G. C. A., y Santiago, A. G. (2020). Medios de enraizamiento y aplicación de auxinas en la producción de plántulas de fresa. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 21 (1), 71-83. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:1319
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., ... y Prithiviraj, B. (2021). "Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development." *Journal of Plant Growth Regulation*, 30(3), 1-17.
- Martínez, G. A., Zamudio, G. B., Tadeo, R. M., Espinosa, C. A., Cardoso, G. J. C., y Vázquez, C. M. G. (2022). Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13 (2), 289-301. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2782>
- Moreno, R. L. P., López, R. H. L., Medina, L. R. C. y Pérez, A. I. (2021). Efecto de bioestimulantes sobre el crecimiento de la Vainilla Tahitensis en Daule, Ecuador. *Revista Científica Ecociencia* 8 (6), 25–38. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.86.606>
- Pérez, D. J. P., Ortega, E. H. M., Ramírez, A. C., Flores, M. H., Sánchez, B. E. I., Can, C. Á., y Mancilla, V. O. R. (2019). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria* 29, e2117. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2117>
- Ramos, O. C. A., Castro, R. A. E., León, F. N. S., Álvarez, S. J. D., y Huerta, L. E. (2019). Lombricomposta para recuperar la fertilidad de suelo franco arenoso y el rendimiento de cacahuate (*Arachis hypogaea* L.). *Terra Latinoamericana* 37(1), 45-55. <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.331>

- Rodríguez, A. T., Cajamarca, C. K., Barrezueta, U. S., Luna, R. A., y Villaseñor, O. D. (2023). Efectos de bioestimulantes en el crecimiento morfológico de plántulas de cacao en etapa de vivero. *Manglar* 20 (2), 117-122. <https://dx.doi.org/10.57188/manglar.2023.013>
- Santana, B. Y., Del Busto, C. A., González, F. Y., Aguiar, G., I., Carrodegua, D. S., Páez, F. P. L., y Díaz, L. G. (2016). Efecto de *Trichoderma harzianum* Rifai y FitoMas-E® como bioestimulantes de la germinación y crecimiento de plántulas de tomate. *Centro Agrícola* 43 (3), 5-12. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852016000300001&lng=es&tlng=es.
- Sepúlveda, B., Nazer, A., y Pavez, O. (2023). Potencial de plantas silvestres para fitorremediación de metales pesados presentes en residuos mineros: un enfoque para restaurar áreas contaminadas. 27 th International Congress on Project Management and Engineering. Donostia, San Sebastián, 10-13 de Julio, 2023. <https://doi.org/10.61547/3415>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Valero, V. N. O., Kenia, A., Chima, M. K. A., y Gómez, G. J. A. (2023). Efecto bioestimulante de una chalcona sintética sobre frijol guajiro (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 21 (2), 62-74. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2153>
- Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., Deckers, J., y Sayre, K. D. (2011). *Conservation Agriculture and Soil Quality: Impacts on Soil Aggregation and Organic Matter Dynamics*. Mexico, D.F.: CIMMYT.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Mario Francisco Santoyo de la Cruz: Es Biólogo, con Maestría y Doctorado en ciencias en Hidrociencias. Posdoctorante en el área de Manejo integral de cuencas y efecto del cambio climático, en el posgrado de Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, México.



Abel Quevedo Nolasco: Es ingeniero en irrigación, con maestría y doctorado en Hidrociencias y es académico en el posgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, México, en el área de Manejo integral de cuencas y efecto del cambio climático.



Cándido Mendoza Peres: Es ingeniero en agrónomo, con maestría y doctorado en Hidrociencias y es académico en el posgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, México, en el área de riego y drenaje agrícola.



Juan Enrique Rubiños Panta: Es ingeniero en agrónomo, con maestría en Hidrociencias y doctorado en Economía del agua. Es académico en el posgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, México, en el área de riego y drenaje agrícola.