

Evaluación del efecto bioestimulante sobre plantas con extractos de microalgas obtenidos a partir de un proceso de economía circular

Alicia M^a González Céspedes¹, Alejandro Ayala Doñas¹, José Andrés Alcoser Bonifaz¹, Joaquín Pozo Dengra² y Cristina Carreño Amate²

Autor de Correspondencia: aliciagonzalez@fundacioncajamar.com

Resumen

En este trabajo se evaluó el efecto bioestimulante de siete extractos de microalgas aplicados en plantas de pepino a nivel de maceta pequeña. Los ensayos se realizaron en la Estación Experimental Cajamar "Las Palmerillas" con aplicaciones a nivel radicular de los diferentes extractos de microalgas proporcionados por la empresa Biorizon Biotech y dentro de las actividades del proyecto Alceres. Las microalgas se han perfilado como una alternativa sostenible a los agroquímicos tradicionales, contienen nutrientes esenciales y fitohormonas que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la fertilidad del suelo. Los extractos se obtuvieron a partir de 3 cepas de microalgas mediante métodos mecánicos-enzimáticos y solventes biocompatibles. Los resultados mostraron que los extractos correspondientes a los tratamientos ALC1 y ALC3 aplicados en la zona radicular en plantas de pepino, tuvieron un efecto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, destacando por un mayor incremento en altura (21,7 y 22,5 cm), número de hojas (5,4 y 5,3 hojas) y contenido de clorofila (SPAD) (22 ddt, ALC1 42,9 $\mu\text{moles m}^{-2}$ y ALC3 37,6 $\mu\text{moles m}^{-2}$), en comparación con el control y el resto de los tratamientos. La materia seca vegetativa, área foliar y materia seca de raíces también fue significativamente mayor en estos tratamientos (ALC1 y ALC3), con valores superiores al resto de tratamientos.

Palabras clave: microalgas, bioestimulantes, extractos, sostenibilidad, cultivos.

Evaluation of the biostimulant effect on plants with microalgae extracts obtained from a circular economy process

Alicia M^a González Céspedes^{1,3}, Alejandro Ayala Doñas¹, Jose Andrés Alcoser Bonifaz¹, Joaquín Pozo Dengra², Cristina Carreño Amate²

Abstract

This study evaluated the biostimulant effect of seven microalgae extracts applied to cucumber plants in small pots. The trials were conducted at the Cajamar "Las Palmerillas" Experimental Station, with root applications of different microalgae extracts provided by

¹ Estación Experimental Cajamar Las Palmerillas. Fundación Grupo Cajamar.

² Biorizon Biotech, S.L.

Biorizon Biotech as part of the Alceres project. Microalgae have emerged as a sustainable alternative to traditional agrochemicals. They contain essential nutrients and phytohormones that promote plant growth and improve soil fertility. The extracts were obtained from three microalgae strains using mechanical-enzymatic methods and biocompatible solvents. The results showed that the

extracts corresponding to the ALC1 and ALC3 treatments applied to the root zone of cucumber plants had a significant effect on plant growth and development, highlighting a greater increase in height (21.7 and 22.5 cm), number of leaves (5.4 and 5.3 leaves) and chlorophyll content (SPAD) (22 DDT, ALC1 42.9 $\mu\text{moles m}^{-2}$ and ALC3 37.6 $\mu\text{moles m}^{-2}$), compared to the control and the rest of the treatments. Vegetative dry matter, leaf area and root dry matter were also significantly higher in these treatments (ALC1 and ALC3), with higher values than the rest of the treatments.

Key Words: microalgae, biostimulants, extracts, sustainability, crops.

1. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento demográfico y el consiguiente aumento de la demanda de alimentos han generado una presión significativa para obtener mejores rendimientos en las producciones agrícolas (Organization, 2009). La implementación de prácticas agrícolas intensivas y la dependencia de agroquímicos pueden generar una variedad de problemas ambientales y agrícolas (Reyes, 2017). Estos problemas incluyen la degradación edáfica, es decir, la pérdida de calidad del suelo debido a procesos como la erosión y la salinización del agua y suelo; y pérdida de biodiversidad edáfica, lo que afecta negativamente a la salud y fertilidad del suelo (Tadesse et al., 2024).

Hoy en día, el uso de bioestimulantes constituye una de las soluciones ante los factores bióticos y abióticos que causan pérdidas y bajo rendimiento en los diferentes cultivos. Los bioestimulantes son productos biológicos, sin residuos y seguros que actúan sobre la fisiología de la planta de diferentes formas, mejorando el vigor, el rendimiento de los cultivos y calidad de los frutos (Chiaiese et al., 2018).

El uso de microalgas, como biofertilizante y/o bioestimulante se ha convertido en una alternativa prometedora que puede sustituir a los productos químicos

tradicionales (García-Gonzalez y Sommerfeld 2016; Díaz et al., 2024). Las microalgas contienen altos niveles de micronutrientes y macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Shaaban 2001). Las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos, que pueden crecer de modo autotrófico o heterotrófico, esta nos brinda una agricultura productiva, eficiente y sostenible económica, social y medioambientalmente (Renuka et al., 2018). Este producto en pequeñas cantidades optimiza los procesos fisiológicos de las plantas, obteniendo una mejor nutrición, tolerancia al estrés, rendimiento o calidad de los cultivos sin causar daños al medio ambiente, tienen la capacidad de proporcionar nutrientes esenciales y producir fitohormonas que promueven el crecimiento de las plantas. Es así, como las microalgas pueden mejorar la fertilidad del suelo de forma natural y sostenible, reduciendo la necesidad de insumos químicos (Álvarez A et al., 2021).

Desde hace décadas las microalgas se han considerado agentes beneficiosos desde un punto de vista agronómico por contribuir a la mejora del carácter fértil del suelo, y con ello al mayor rendimiento de los cultivos (Singh et al., 2016). De entre los beneficios que aportan, destacan el aumento de la porosidad del suelo, el control del pH, el incremento en la disponibilidad de nutrientes o el aporte de nitrógeno, en el caso de aquellas microalgas capaces de fijar nitrógeno. Además del importante papel que juegan en los ciclos del C y N, se conocen diferentes géneros de microalgas que acumulan y excretan fitohormonas (Lu y Xy, 2015; Singh et al., 2016; Meena et al., 2017), además de vitaminas (especialmente la vitamina B12) y aminoácidos (Singh et al., 2016). Se sabe que la producción de algunas de estas fitohormonas puede implicar de forma indirecta la activación de los mecanismos de resistencia vegetal (Meena et al., 2017). También se ha sugerido que las microalgas pueden mejorar la biodisponibilidad del fósforo en las plantas, al solubilizar y movilizar los fosfatos orgánicos insolubles presentes en el suelo, con la ayuda de enzimas fosfatasas.

Actualmente, el uso de las microalgas como agentes promotores del crecimiento vegetal en cultivos como el arroz, trigo, algodón, legumbres y hortalizas, se considera una alternativa al uso de fertilizantes químicos y plaguicidas, los cuales son mucho más perjudiciales desde el punto de vista ambiental y sanitario (Prasanna et al., 2015).

La integración de microalgas en los sistemas agrícolas no sólo puede mitigar los efectos negativos del uso intensivo de agroquímicos, sino que también puede contribuir a prácticas agrícolas más sostenibles y ambientalmente responsables.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de 7 extractos de microalgas en plantas de pepino a nivel de plántula, obtenidos a partir biomasa de tres cepas de microalgas producidas mediante fuentes de nutrientes residuales y utilizando medios de extracción y preparación de los extractos diferentes.

2.- MATERIAL Y MÉTODOS

2.1.-Localización

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Cajamar "Las Palmerillas", localizada en el término Municipal de El Ejido (Almería), en condiciones de plántula y en maceta, con aplicaciones en la zona radicular. Se utilizó como sustrato de las plantas una mezcla de turba rubia con perlita.

Para realizar este ensayo se dispuso de un invernadero multitúnel dedicado a semillero, con bancadas de 1,2 m de altura donde se colocaron las bandejas con las pequeñas macetas de plantas. El riego fue por aspersión y ventilación mecánica. Las condiciones climáticas fueron las normales para la estación correspondiente sin que se modificará, para asemejarlo a las condiciones reales de producción.

2.2.- PREPARADO DE LOS EXTRACTOS

Durante el desarrollo del proyecto Alceres en etapas anteriores se seleccionaron tres cepas de microalgas, de entre una colección de cepas previamente

aisladas, en base a su capacidad bioestimulante y capacidad de crecimiento en medio de nutrientes formulado a partir de nitrógeno (N) y fósforo (P) residual, proveniente de purines y lixiviados vegetales. Las microalgas proceden de cultivos frescos en condiciones de laboratorio. Estas microalgas fueron suministradas de dos colecciones de cultivo reconocidas: Mosonmagyaróvár Algal culture collection (MACC) y Spanish Bank of Algae (SBA) (Proyecto SABANA). Las especies microalgas seleccionadas fueron *Scenedesmus* sp. y *Chlorella* sp.

Para obtener los extractos se utilizaron diferentes métodos de rotura y extracción. Las técnicas convencionales incluyen el uso de disolventes orgánicos, mientras que los nuevos métodos de extracción en cambio apuestan por la obtención de extractos sin disolventes, en un entorno más seguro tanto para las plantas como para los seres humanos (Michalak et al., 2015).

Un factor importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar un método de extracción adecuado es la resistencia a la rotura de la pared celular cuya composición varía mucho entre especies, formas y tamaño celular.

Para esta etapa del proceso y para obtener los extractos se utilizaron varios métodos de naturaleza física, térmica o enzimática para romper la pared celular y poder extraer los compuestos de interés bioestimulante.

Los métodos de extracción que se llevaron a cabo fueron:

1.- Rotura celular e hidrolisis con enzimas proteolíticas, liberando el contenido celular, hasta producir aminoácidos libres. (Patente Biorizon Biotech, 13/12/2018, C05F5/00-C05F3/00).

2.- Rotura de la biomasa mediante métodos mecánicos suaves (sonificación Branson Sonicator 150) y extracción usando solventes biocompatibles como agua, etanol y/o hexano de los extractos sonicados (metodología Proyecto Algae4control).

Se obtuvieron 7 extractos diferentes 4 procedentes de rotura de las células mediante enzimas (ALC1, ALC2, ALC3 y ALC4), y el resto mediante rotura mecánica suave y extracción con solventes como etanol, agua y hexano (ALC5, ALC6 y ALC7). ALC1 y ALC2 proceden de la microalga *Chlorella* sp., obteniendo una vez filtrada la biomasa procesada un extracto filtrado y un extracto residual, lo mismo se hizo con la microalga *Scenedesmus* sp., obteniendo los extractos ALC3 (biomasa residual) y ALC4 (extracto filtrado). ALC5, ALC6 y ALC7 proceden de cultivos vivos de *Scenedesmus* sp., obteniendo 3 extractos diferentes. En la tabla se puede observar para cada extracto el tipo de microalga, biomasa utilizada, método de extracción y concentración del extracto.

Extracto	Microalga	Tipo biomasa	Método de procesado	Concentración mg L ⁻¹
ALC1	<i>Chlorella</i> sp.	Extracto biomasa residual	Hidrólisis enzimática	1
ALC2	<i>Chlorella</i> sp.	Extracto	Hidrólisis enzimática	1
ALC3	<i>Scenedesmus</i> sp.	Extracto biomasa residual	Hidrólisis enzimática	1
ALC4	<i>Scenedesmus</i> sp.	Extracto	Hidrólisis enzimática	1
ALC5	<i>Scenedesmus</i> sp.	Cultivo vivo	Sonicados/Solventes	1
ALC6	<i>Scenedesmus</i> sp.	Cultivo vivo	Sonicados/Solventes	0,5
ALC7	<i>Scenedesmus</i> sp.	Cultivo vivo	Sonicados/Solventes	0,5

Tabla 1.- Tipo de microalga, biomasa, método de procesado y concentración en cada uno de los extractos obtenidos.

2.3.- ENSAYOS Y TRATAMIENTOS

El ensayo se realizó en condiciones de plantas en minimacetas y en un invernadero tipo semillero. Los extractos se aplicaron en la zona radicular de cada una de las plantas, previamente cada extracto se diluyó en agua y posteriormente se aplicaba en cada planta. Se realizaron dos aplicaciones, la primera tras el trasplante de las plantas en las minimacetas y la segunda aplicación transcurridos 7 días desde la primera aplicación. Las dosis de cada extracto se pueden observar en la tabla 1.

El número de tratamientos fueron 8, un tratamiento control sin ninguna aplicación de ningún extracto y 7 tratamientos, cada uno con un extracto diferente de microalgas, con una concentración de 1mg por cada 1ml para los extractos ALC1; ALC2; ALC3; ALC4 y ALC5, mientras que la concentración de los extractos ALC6 y ALC7 fue de 0,5 mg por cada 1 ml. Cada planta recibió 10 mg en total de cada extracto en dos aplicaciones. En la tabla 2 se puede ver la nomenclatura de cada tratamiento y la dosis aplicada según la concentración de cada extracto para aplicar la misma cantidad de microalga.

Tratamiento	Extracto	Dosis radicular ml planta ⁻¹	Dosis extracto mg planta ⁻¹
T1	Control	-	-
T2	ALC1	5	5
T3	ALC2	5	5
T4	ALC3	5	5
T5	ALC4	5	5
T6	ALC5	5	5
T7	ALC6	10	5
T8	ALC7	10	5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.- Tratamientos evaluados para cada extracto de microalga, así como la dosis utilizada según aplicación radicular.

2.3.1.- Descripción del ensayo

Se utilizó plantas de pepino tipo Almería, variedad Marketmore de Biosemillas, las plantas una vez que tuvieron la primera hoja verdadera se trasplantaron (con 20 a 25 días después de la siembra) a unas minimacetas de volumen de 200 ml, con un sustrato mezcla de turba y perlita (3:1, v/v), el trasplante se realizó el 29 de abril de 2024. Se empezó a controlar el crecimiento de las plantas. Transcurridos 7 días desde el trasplante se procedió a hacer la primera aplicación de cada extracto, previamente diluido un 20% en agua y aplicando esta disolución en cada planta en la zona radicular. La segunda aplicación se realizó 7 días después de la primera aplicación. El ensayo se mantuvo 29 días haciendo medidas de crecimiento semanalmente.

Se utilizaron 15 plantas por tratamiento.

Solo se aportó agua sin ningún tipo de fertilizante por vía riego.



Fotografía 1. Disposición de las plantas de pepino en el ensayo realizados con los diferentes extractos bioestimulantes de microalgas. Fuente: Elaboración propia.

2.4.- DETERMINACIONES

2.4.1.- Crecimiento de la parte aérea

Desde el trasplante de las plantas se procedió a medir semanalmente la altura de la planta, número hojas y flores (en caso de que aparecieran), hasta la finalización de cada ensayo, además, se analizó el estado de la planta. También, se realizaron medidas de clorofila (SPAD) mediante un equipo portátil (SPAD-502 Plus 2900P) mostrando los valores directamente en $\mu\text{moles m}^{-2}$. Las medidas se realizaron en las hojas desarrolladas de la parte activa de crecimiento, esta medida se realizó en tres ocasiones a lo largo del desarrollo de las plantas.

2.4.2.- Desarrollo final de las plantas

Al final del ciclo se realizó la biomasa final destructiva de todas las plántulas, donde se midió altura de planta, diámetro del tallo, área foliar, peso fresco y seco de plantas, peso fresco y seco de raíces y estado de las raíces. La determinación del área foliar se midió con un planímetro electrónico (Delta-T Devices LTD, Cambridge, Reino Unido).

Para determinar el peso seco de cada parte de la planta se separó los tallos, hojas y raíces, pesando cada parte individualmente y secándose en una estufa de ventilación forzada a 65 °C hasta alcanzar un peso constante.

2.4.3.- Tratamiento de los datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA; $p < 0,05$) para todas las variables definidas en el ensayo. Se utilizó la prueba MDS (Diferencia Menos Significativa) de Fisher para comparar los valores medios de los diferentes tratamientos y determinar si había diferencias significativas entre ellos.

Los resultados del análisis estadístico se presentaron en forma de figuras con barras de error que representan la desviación estándar, y las letras indican los grupos homogéneos. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando Statgraphics Centurion XIX versión 19.4.01 (Stat-Point, Inc.).

En este ensayo no hubo pérdidas de plantas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Crecimiento vegetativo a lo largo del ensayo

A lo largo del ensayo se puede observar que tras la primera aplicación de los extractos de microalgas hubo dos tratamientos que mostraron un efecto muy significativo en el desarrollo de las plantas de pepino con respecto al resto de tratamientos (Figura 1), mostrando diferencias significativas en las dos últimas fechas evaluadas (22 ddt y 29 ddt).

El crecimiento de las plantas medido como incremento de altura y número de hojas fue mayor significativamente, con respecto al resto de tratamientos, en los tratamientos ALC3 y ALC1, alcanzando un incremento de altura de 22,5 cm y 21,7 cm, respectivamente, con un número de hojas de 5,3 y 5,4 hojas por planta para los mismos tratamientos (ALC3 y ALC1). Las plantas que menos crecieron fueron las del tratamiento ALC2 con un incremento de altura de 11,9 cm y 3,8 hojas por plantas, siendo estos valores muy similares a los tratamientos Control, ALC4, ALC6 y ALC7 (Figura 1). Las plantas del tratamiento ALC5 (15,3 cm) tuvieron un crecimiento algo mayor al tratamiento control, ALC4, ALC6 y ALC7, sin que se encontraran diferencias significativas.

En la figura 1 podemos observar los valores promedio de la clorofila medido como SPAD en $\mu\text{moles m}^{-2}$ en las hojas desarrolladas de la parte superior de la planta (hojas más jóvenes), donde se observó que en las fechas 22 ddt y 29 ddt se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, cuando se aplicaron los diferentes extractos.

En la fecha 22 ddt el valor de clorofila fue mayor significativamente en el tratamiento ALC1 ($42,9 \mu\text{moles m}^{-2}$) respecto al resto de tratamientos, seguido del valor del tratamiento ALC3 ($37,6 \mu\text{moles m}^{-2}$) que a su vez fue significativamente mayor al tratamiento ALC5 ($33,2 \mu\text{moles m}^{-2}$). Estos valores coinciden con el mayor crecimiento de las plantas de estos tratamientos.

Los valores de clorofila fueron significativamente menores en los tratamientos Control ($27,9 \mu\text{moles m}^{-2}$), ALC2 ($25,3 \mu\text{moles m}^{-2}$), ALC4 ($27,2 \mu\text{moles m}^{-2}$), ALC6 ($28,3 \mu\text{moles m}^{-2}$) y ALC7 ($28,9 \mu\text{moles m}^{-2}$) con respecto a los tratamientos ALC1 y ALC3 ($42,9 \mu\text{moles m}^{-2}$ y $37,6 \mu\text{moles m}^{-2}$, respectivamente).

Al finalizar el ensayo (29 ddt) el valor significativamente mayor respecto al resto de tratamientos correspondió al tratamiento ALC1 ($43,1 \mu\text{moles m}^{-2}$) con valor similar en la fecha 22 ddt, determinando que la aplicación del extracto ALC1 tuvo un efecto muy positivo en la bioestimulación de las plantas de pepino con mayor actividad fotosintética de las plantas, lo que determinó un mayor desarrollo vegetativo. El segundo tratamiento con mayor valor de clorofila fue en tratamiento ALC3 ($35,3 \mu\text{moles m}^{-2}$), seguido de los tratamientos ALC6 ($30,7 \mu\text{moles m}^{-2}$) y ALC5 ($28,8 \mu\text{moles m}^{-2}$) encontrando diferencias significativas. Los valores más bajos significativamente en clorofila en la fecha 29 ddt, fueron en los tratamientos control, ALC2, ALC4 y ALC7 (Figura1).

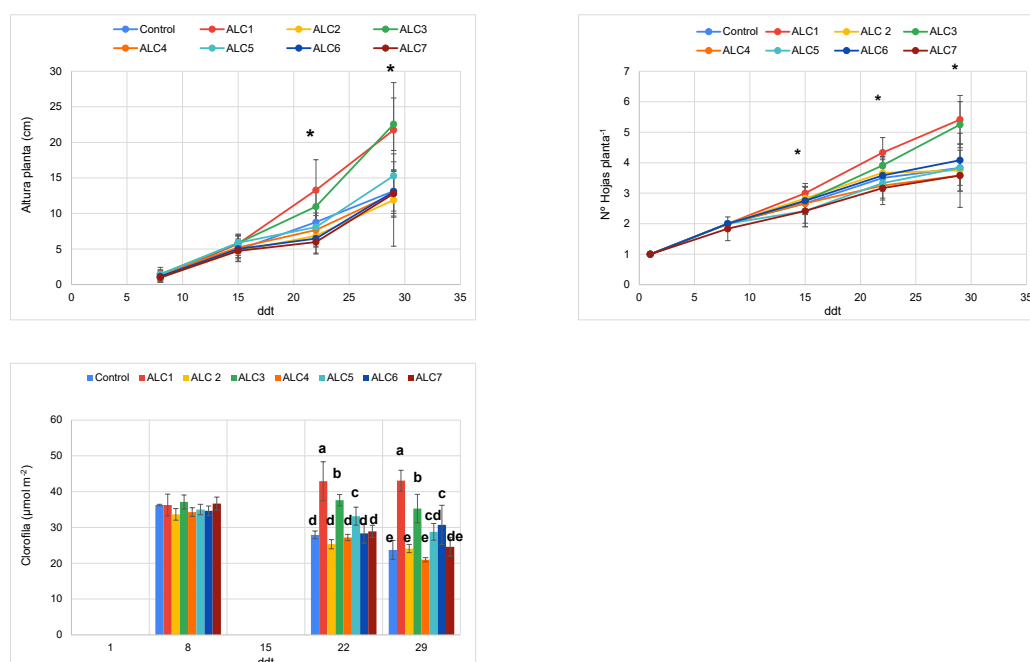


Figura 1.- Evolución de la altura, número de hojas y medida de clorofila de las plantas de pepino para cada uno de los extractos de microalgas evaluados aplicados en la zona radicular.

* Nos indica diferencias estadísticamente significativas (MDS 95%). Las letras diferentes (a, b, c, d) indican grupos de homogeneidad estadísticamente significativos (MDS 95%) según la prueba de diferencia de medias

Fuente: Elaboración propia.

3.2.- Crecimiento vegetativo y radicular final.

Se observó que la materia seca de la parte vegetativa de las plantas de pepino fue mayor significativamente en los extractos ALC3 y ALC1 respecto a los demás tratamientos, incluido el tratamiento control (Tabla 3). El tratamiento ALC2 mostró un valor intermedio (1,2 g planta⁻¹), mientras que el tratamiento ALC4 registró el valor más bajo (0,94 g planta⁻¹). El resto de los tratamientos tuvieron valores similares sin diferencias notables entre ellos. En cuanto al área foliar, que mide el área de las hojas, los tratamientos ALC1 y ALC3 mostraron los valores más altos, seguidos por ALC2, todos con diferencias significativas en comparación al control (T-1). Los tratamientos ALC7 y ALC4 (80 y 98,6 cm² respectivamente) fueron los que presentaron menor área foliar, siendo significativamente menores al resto de tratamientos.

Respecto al diámetro de tallo, que revela la cantidad de tejido vascular, el tratamiento ALC1 obtuvo el mayor valor, con diferencias significativas frente al

resto de los tratamientos. Los demás tratamientos no mostraron diferencias significativas comparados con el control (T-1). Finalmente, la materia seca de raíces, que evalúa la capacidad de absorción de nutrientes de la planta, crucial para su crecimiento, mostró que los tratamientos ALC1 y ALC3 destacaron con los rendimientos más altos, presentando diferencias significativas respecto al resto de tratamientos. Los tratamientos ALC2, ALC4, ALC5 y ALC6 mantuvieron valores similares al control, mientras que ALC7 tuvo el menor peso de raíces secas, indicando una menor eficiencia en la absorción de nutrientes y un potencial retraso en el crecimiento del cultivo.

Tratamientos	Materia seca vegetativa g planta ⁻¹	Área foliar cm ²	Diámetro tallo mm	Materia seca raíces g planta ⁻¹
Control	1,08 ± 0,19 c	79,7 ± 19,2 d	5,43 ± 0,34 b	0,14 ± 0,04 b
ALC1	1,57 ± 0,43 a	324,8 ± 79,2 a	6,36 ± 0,59 a	0,24 ± 0,08 a
ALC2	1,2 ± 0,41 b	122,3 ± 47,6 b	5,09 ± 1,68 b	0,15 ± 0,04 b
ALC3	1,64 ± 0,19 a	241,4 ± 38,6 a	5,63 ± 0,43 b	0,21 ± 0,01 a
ALC4	0,94 ± 0,17 c	98,6 ± 36,4 dc	5,30 ± 0,26 b	0,12 ± 0,03 b
ALC5	1,04 ± 0,07 c	114,9 ± 22,1 bc	5,53 ± 0,34 b	0,11 ± 0,02 b
ALC6	1,05 ± 0,15 c	125,1 ± 14,8 bc	5,65 ± 0,72 b	0,12 ± 0,03 b
ALC7	1,02 ± 0,15 c	80,1 ± 25,4 d	5,29 ± 0,33 b	0,05 ± 0,03 c

Las letras diferentes (a, b, c, d) indican grupos de homogeneidad estadísticamente significativos (MDS 95%) según la prueba de diferencia de medias. Los tratamientos que comparten la misma letra no difieren significativamente entre sí, mientras que aquellos con letras distintas sí presentan diferencias estadísticamente significativas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.- Valores de materia seca aérea, área foliar, calibre de tallo y materia seca de raíces para los diferentes tratamientos de extractos de microalgas evaluadas en plantas de pepino.



Fotografía 2. Crecimiento de las plantas de pepino para cada tratamiento de extracto bioestimulante de microalgas y control. Fuente: Elaboración propia.

El mayor desarrollo de las plantas de pepino en los tratamientos ALC1 y ALC3 respecto al resto de tratamientos quizás pudo deberse al mayor efecto bioestimulante de estos extractos respecto al resto de extractos, influyendo el modo en que se preparan y obtienen los extractos de microalgas y como los extractos de determinadas microalgas pueden promover el crecimiento de las plantas (Alvarez et al., 2021).

Utilizando soluciones acuosas e hidrolizados de la biomasa de *Chlorella* sp. y *C. vulgaris* como biofertilizante y/o promotor del crecimiento se ha promovido la germinación de semillas de cultivos como melón, tomate, pepino y maíz (Corona, 2020).

Para obtener un producto más efectivo es necesario romper la pared celular para liberar todos los componentes intracelulares, lo que se lleva a cabo fácilmente mediante hidrólisis enzimática, un proceso de bajo coste y fácilmente escalable (Romero García et al. 2012). En este sentido, se han realizado varios estudios para evaluar el efecto de los fertilizantes de microalgas en diferentes cultivos.

Las microalgas juegan un papel importante en el aporte de fitohormonas que promueven el crecimiento de las plantas. Las citoquininas están involucradas en la activación de las funciones de división celular, organogénesis y senescencia tardía de las plantas, mientras que el ácido salicílico está directamente relacionado con la activación de la respuesta defensiva de las plantas (Toribio, 2021).

En estudios anteriores realizados por Toribio (2021), con dos extractos de microalgas (*Anabaena* y *Nostoc*), obtenidos mediante métodos sonicados y aplicados en la zona radicular obtuvieron incrementos de crecimiento en las plantas en las dos dosis empleadas, incrementándose tanto el desarrollo de la parte aérea como el radicular en plantas de pepino. Sin embargo, el extracto

de *Nostoc* incrementó en mayor medida el crecimiento radicular (más del 60% de incremento de crecimiento radicular), pero donde mejores resultados obtuvieron fue en la longitud del tallo, producción de hojas, peso fresco de planta y diámetro de tallo. Otros estudios determinaron un mayor crecimiento de la raíz y el brote de semillas de *Solanum lycopersicum* y *Cucumis sativus*, siendo las concentraciones más efectivas 0,17 y 0,25 gL⁻¹ de suspensión algal, respectivamente (Bumandalai y Tserennadmid, 2019). Mientras que otros extractos de otras cepas de microalgas el efecto fue más discreto, se detectó tras la aplicación mejoras en el desarrollo vegetativo, pero no el radicular. Establecieron que la producción de fitohormonas de los extractos analizados estaba más relacionada con el crecimiento de las plantas (medido como peso de planta), mientras que la producción de citoquininas y ácido salicílico se relacionó positivamente con el índice de germinación y el desarrollo radicular.

Solo unos pocos estudios han caracterizado los constituyentes químicos responsables de la promoción del crecimiento vegetal. En las etapas iniciales de germinación y elongación de la raíz es fundamental establecer el equilibrio entre salicílico y citoquininas, mientras que, en las últimas etapas de plántula, la presencia de agentes quelantes tipo sideróforo es determinante para el óptimo desarrollo de la planta (Toribio, 2021).

Hay estudios donde la aplicación de biomasa de microalgas en el suelo mejoró el peso fresco y seco de las plántulas, así como su contenido de pigmentos (Faheed et al., 2008).

Las hormonas promotoras de raíces, como las auxinas, citoquininas y el ácido giberélico, han demostrado un impacto positivo significativo en el crecimiento de plantas y el desarrollo de cultivos.

4. CONCLUSIONES

1. Los extractos de microalgas aplicados en la zona radicular en los tratamientos ALC1 y ALC3, tuvieron un notable efecto bioestimulante en las plántulas de pepino, mejorando significativamente su crecimiento tanto de la parte vegetativa como radicular de las plantas en comparación con el control y el resto de los tratamientos. Hubo diferencias significativas entre tratamientos en todas las fechas muestreadas excepto en el inicio, con mayores valores en los tratamientos ALC1 y ALC3, en altura de planta, nº hojas por planta, materia seca vegetativa, área foliar y materia seca de raíces.
2. El método de preparación y obtención de los extractos de microalgas es crucial para maximizar su efectividad bioestimulante. Los extractos obtenidos mediante procesos enzimáticos resultaron ser los más eficaces (ALC1 y ALC3).
3. Los mejores resultados de los extractos procedentes de una hidrólisis enzimática y aplicados por vía radicular se puede deber a que el método de rotura de las células de las microalgas fue más eficiente, ya que estos extractos contienen toda la biomasa de microalgas, mientras que resto de extractos en los cuales se utilizaron otros medios de rotura y se utilizaron disolvente para recuperar los componentes nutricionales de las microalgas, descartando el resto de la biomasa.
4. Los efectos de los bioestimulantes dependen en gran medida del cultivo al que se aplican, las dosis empleadas y los métodos utilizados para su extracción.
5. Las microalgas pueden representar una alternativa sostenible y ecológica a los fertilizantes y agroquímicos convencionales ya que ofrecen nutrientes esenciales y compuestos bioactivos que promueven el desarrollo vegetal, para ello es fundamental determinar los modos de producción de las microalgas y obtención de los biocompuestos que contienen.

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Weyers, S., Goemann, H., Peyton, B., Gardner, R. (2021). Investigación sobre algas. Obtenido de Microalgas, suelo y plantas: una revisión crítica de las microalgas como recursos renovables para la agricultura: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- BUMANDALAI, O., R. TSERENNADMID. (2019). Effect of *Chlorella vulgaris* as a biofertilizer on germination of tomato and cucumber seeds. *International Journal of Aquatic Biology*, 7(2), pp. 95-99. ISSN: 2322-5270
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, K., Roupheal, Y. (2018). Renewable Sources of Plant Biostimulation: Microalgae as a Sustainable Means to Improve Crop Performance. Recuperado de doi: 10.3389/fpls.2018.01782
- CORONA, Z.C. (2020). Conferencia de apertura. I Taller Soberanía Alimentaria con más Ciencia, Teatro Heredia, Santiago de Cuba, 25 de Septiembre.
- Díaz-pérez, m., Moreno, J.M., Hernández, J.J., Callejón-ferre, A.J. (2024). Application of microalgae in cauliflower fertilisation. Obtenido de *Scientia Horticulturae*: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113468>
- Faheed, F.A.; Fattah, Z.A. Effect of *Chlorella vulgaris* as Biofertiliser on Growth Parameters and Metabolic Aspects of Lettuce. (2008). *Plant. J. Agric. Soc. Sci*, 4, 165–169.
- Garcia-Gonzalez ,J., Sommerfeld, M. (2016) Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *J Appl Phycol* 28:1051–1061. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>
- Lu, Y. y Xu, J. (2015). Phytohormones in microalgae: A new opportunity for microalgal biotechnology. *Trends in Plant Science* 20(5), 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.01.006>

- Meena, M., Swapnil, P., Zehra, A., Aamir, M., Dubey, M.K., Goutam, J. y Upadhyay, R.S. (2017). Beneficial microbes for disease suppression and plant growth promotion. En D.P. Singh, H.B. Singh y R. Prabha (eds.). *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Springer Nature, Singapore, 395- 432.
- Michalak, I., Chojnacka, K. (2015). Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, 15(2), 160-176. <https://doi.org/10.1002/ELSC.201400191>.
- Organization, F. A. (2009). FAO's Director-General on How to Feed the World in 2050. *Population and Development Review*, 35(4), 837–839., 1-35. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/25593700>
- Plaza, BM, Gómez-Serrano, C., Acién-Fernández, FG et al. (2018) Effect of microalgae hydrolysate foliar application (*Arthrospira platensis* and *Scenedesmus* sp.) on *Petunia x hybrida* growth. *J Appl Phycol* 30, 2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1427-0>.
- Prasanna, R., Babu, S., Bidyarani, N., Kumar, A., Triveni, S., Monga, D., Mukherjee, A. K., Kranthi, S., Narkhedkar, N. K., Adak, A., Yadav, K., Nain, L. y Saxena, A. K. (2015). Prospecting cyanobacteria-fortified composts as plant growth promoting and biocontrol agents in cotton. *Experimental Agriculture* 51(1), 42-65. Doi; 10.1017/s0014479714000143
- Renuka et al., 2. (2018). Las microalgas como opciones multifuncionales en la agricultura moderna: tendencias actuales, perspectivas y desafíos. *ELSEVIER*, 36, 1255-1273. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.004
- Reyes, G. E. (2017). Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012).

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612017000100005&lng=es&tlng=es.

Romero García, J.M., Acién Fernández F.G., Fernández Sevilla J.M. (2012) Development of a process for the production of l-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis. *Bioresour Technol* 112:164–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.094>

Shaaban, M. (2001) Green microalgae water extract as foliar feeding to wheat plants. *Pak J Biol Sci* 4(6):628–632.

Singh J. S., Kumar A., Rai A. N., and Singh D. P. (2016). Cyanobacteria: A Precious Bio-resource in Agriculture, Ecosystem, and Environmental Sustainability. *Front Microbiol.* 2016; 7: 529. Doi; 10.3389/fmicb.2016.00529.

Swain, S.S., Paidisetty, S.K., Padhy, R.N. (2017). Antibacterial, antifungal and antimycobacterial compounds from cyanobacteria. *Biomed. Pharmacother.* 90, 760-776. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.04.030

Tadesse K.A., Lu, Z., Shen, Z., Daba, N.A., Li, J., Alam, M.A., Lisheng, L., Gilbert, N., Legesse, T.G., Huimin, Z. (2024). Impacts of long-term chemical nitrogen fertilization on soil quality, crop yield, and greenhouse gas emissions: With insights into post-lime application responses. *Obtenido de Science of The Total Environment*: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173827>

Toribio, A.J.; Suárez-Estrella, F.; Jurado, M.M.; López, M.J; López González, J.A.; Moreno, J. (2020). Prospection of cyanobacteria producing bioactive substances and their application as potential phytostimulating agents. *Biotechnology Report*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.020>.

AGRADECIMIENTO

Proyecto ALCERES, “Economía circular para la producción de extractos bioestimulantes de microalgas mediante recuperación de Nitrógeno y Fósforo

residual", convocatoria Colaboración Público Privada 2021, Ministerio de Ciencia e Innovación, cofinanciado tanto por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de la Agencia Española de Investigación y por la Unión Europea a través de los fondos NextGeneration.