

Efecto del extracto de *Limnospira maxima* sobre parámetros fisiológicos de stevia *Stevia rebaudiana* Bert. y berenjena *Solanum melongena* L. bajo condiciones controladas

Effect of *Limnospira maxima* on physiological parameters of stevia *Stevia rebaudiana* Bert. and eggplant *Solanum melongena* L. under controlled conditions

Anthony R. Ariza González^{1*}; Alfredo J. Jarma Orozco¹
Ana I. Pico González¹; Juan D. Jaraba Navas¹; Yirlis Y. Pineda Rodríguez¹
Adriana Vallejo Isaza¹; Daniela Vegliante Arrieta¹; Diana S. Herazo Cárdenas¹

Recibido para publicación: 27 de julio de 2023 - Aceptado para publicación: 02 de septiembre de 2023

RESUMEN

Una estrategia que podría disminuir parcial o totalmente el uso de fertilizantes de síntesis química es la aplicación de cianobacterias con potencial agrícola que promueven el crecimiento vegetal, lo que las potencia en la concepción de una agricultura sostenible. En el trabajo se evaluó el efecto de cuatro concentraciones de un extracto de *Limnospira maxima* (0, 4, 8, y 12 mg mL⁻¹), sobre algunos aspectos fisiológicos de *Stevia rebaudiana* y *Solanum melongena* en casa vegetación. Los tratamientos se arreglaron bajo un diseño completo al azar y se midieron parámetros de intercambio gaseoso, fluorescencia de la clorofila a, caracteres biométricos y distribución de biomasa. Los resultados más importantes indicaron que en *Stevia rebaudiana* y *Solanum melongena* las tasas de fotosíntesis neta se incrementaron respectivamente en 40,03% y 22,45% cuando se aplicó la cianobacteria. Por otra parte, las plantas de ambas especies que fueron inoculadas requirieron de una menor cantidad de electrones para maximizar sus tasas de fotosíntesis, aumentaron el área foliar, la altura de planta y la distribución de biomasa en raíces y hojas. El indicador fisiológico más importante fue la fotosíntesis neta y este se correlacionó positivamente con casi todos los parámetros estudiados. Los resultados sugieren que el uso del extracto de *L. maxima* puede ser una alternativa biotecnológica de fertilización orgánica útil para el desarrollo de una agricultura sostenible.

Palabras clave: Cianobacterias, extracto, fertilización orgánica, fotosíntesis neta, fluorescencia, *Limnospira maxima*.

¹Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

Autor para correspondencia: Anthony R. Ariza González

Email: aarizagonzalez28@correo.unicordoba.edu.co



Temas Agrarios 2023. Este artículo se distribuye bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>), que permite copiar, redistribuir, remezclar, transformar y crear a partir del material, de forma no comercial, dando crédito y licencia de forma adecuada a los autores de la obra.

ABSTRACT

A strategy that could partially or totally reduce the use of chemical synthesis fertilizers is the application of cyanobacteria with agricultural potential that promote plant growth, which powers them in the conception of a sustainable agriculture. The study evaluated the effect of four concentrations of an extract of *Limnospira maxima* (0, 4, 8, and 12 mg mL⁻¹), on some physiological aspects of *Stevia rebaudiana* and *Solanum melongena* in house vegetation. Treatments were arranged under a complete random design and parameters of gas exchange, chlorophyll a fluorescence, biometric characteristics and biomass distribution were measured. The most important results indicated that in *Stevia rebaudiana* and *Solanum melongena* the rates of net photosynthesis increased respectively by 40,03% and 22,45% when cyanobacteria was applied. On the other hand, plants of both species that were inoculated required less electrons to maximize their photosynthesis rates, increased leaf area, plant height and biomass distribution in roots and leaves. The most important physiological indicator was net photosynthesis and this was positively correlated with almost all the parameters studied. The results suggest that the use extracts of *L. maxima* may be a biotechnological alternative of organic fertilization useful for the development of sustainable agriculture.

Key words: Cyanobacteria, extract, organic fertilization, Net photosynthesis, fluorescence, *Limnospira maxima*.

Cómo citar

Ariza González, A.R., Jarma Orozco, A.J., Pico González, A.I., Jaraba Navas, J.D., Pineda Rodríguez, Y.Y., Vallejo Isaza, A., Vegliante Arrieta, D. y Herazo Cárdenas, D.S. 2023. Efecto del extracto de *Limnospira maxima* sobre parámetros fisiológicos de stevia *Stevia rebaudiana* Bert. y berenjena *Solanum melongena* L. bajo condiciones controladas Temas Agrarios 28(2): 177-191. <https://doi.org/10.21897/qcvsn05>

INTRODUCCIÓN

Una de las limitaciones en la producción de alimentos es la aplicación excesiva de fertilizantes de síntesis química que puede ocasionar problemas económicos, daños irreversibles en la biodiversidad y disminución de las reservas energéticas de las aguas superficiales y subterráneas, generando consecuencias devastadoras en los ecosistemas y alteraciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Britos *et al.*, 2022; Alharbi *et al.*, 2023). En consecuencia, se hace necesario estar en la exploración de soluciones más sostenibles con el medio ambiente para mejorar la productividad agrícola (Olorunwa *et al.*, 2022). Teniendo en cuenta esta situación, es importante evaluar alternativas de fertilización orgánica obtenido de organismos vivos que permitan su fácil accesibilidad para ser funcionales desde un enfoque de agricultura sostenible, siendo una posible solución real, la implementación de cianobacterias con potencial agrícola en los cultivos (Deviram *et al.*, 2020; Orona-Navar *et al.*, 2021).

Las cianobacterias, cuando se aplican, pueden aumentar la disponibilidad de nutrientes de los cultivos y ayudar a mejorar las propiedades del suelo (Martínez-Vega *et al.*, 2022). El uso de las cianobacterias con potencial agrícola como una alternativa ecológica, permite garantizar a través de su composición química del extracto compuestos bioactivos que promueven el crecimiento de las plantas a partir del aporte de nutrientes esenciales como el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el hierro, el cobre, entre otros (Shedeed *et al.*, 2022). Además, tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfato, producir sustancias bioactivas, como fitohormonas (auxinas, giberelinas, citoquininas), polipéptidos, aminoácidos, polisacáridos y

sideróforos, que tienen efectos estimulantes sobre las plantas (Deviram *et al.*, 2020; Orona-Navar *et al.*, 2021; Ekeuku *et al.*, 2022).

Entre esas especies con potencial agrícola se encuentra *Limnospira maxima*, que es una cianobacteria que es utilizada en aditivos alimentarios, en alimentos naturales, en cosméticos, en productos farmacéuticos y medicamentos, sin embargo, su aplicabilidad biotecnológica como extracto en la agricultura es incipiente, lo que podría representar una oportunidad para su estudio (Ertani *et al.*, 2019; Shedeed *et al.*, 2022). Actualmente, las investigaciones sobre el uso de cianobacterias en la agricultura han señalado su potencial como biofertilizantes y como fuente de compuestos bioactivos, como las ficobiliproteínas, para el control de patógenos vegetales y como inductores de resistencia sistémica, entre tanto, los estudios en relación al impacto que pudiesen tener en el crecimiento y desarrollo de las plantas son carentes (Ren *et al.*, 2023). Dadas los beneficios potenciales que tienen las cianobacterias para el desarrollo de una agricultura sostenible, la biomasa aplicada como un fertilizante orgánico a través de extractos es un recurso valioso, porque se podría limitar parcialmente la fertilización de síntesis química en los modelos de producción agrícola (Muratova *et al.*, 2023).

Desde una visión más general, uno de los avances más recientes es la adopción de fertilización orgánica en los sistemas de producción, que retrasan la nitrificación por un período prolongado y aumentan la fertilidad del suelo (Ren *et al.*, 2023). Se ha demostrado que el uso de fertilizantes orgánicos promueve el crecimiento de las plantas, pero se desconoce el uso de las cianobacterias como una “estrategia” de manejo que permitiría mitigar las preocupaciones ambientales que pueden ser causadas por los fertilizantes químicos

(Yassen *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2023). Sin embargo, desde el punto de vista de la fisiología vegetal, estudios comprueban que el uso de cianobacterias a través de extractos permitió una mayor disponibilidad de nutrientes, absorción de agua y los indicadores fisiológicos del crecimiento de las plantas incrementaron significativamente, como se ha demostrado en la lechuga (Mógor *et al.*, 2018), el tomate (Supraja *et al.*, 2020), el pepino (Toribio *et al.*, 2020), la espinaca (Mala *et al.*, 2017), la cebolla (Geris y Elsadany, 2021), entre otros.

Dado el impacto que podrían tener las cianobacterias en los indicadores fisiológicos de las plantas, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de extractos de *Limnospira maxima* sobre el crecimiento inicial y algunos aspectos fisiológicos en *Stevia rebaudiana* y *Solanum melongena* bajo condiciones controladas. Los hallazgos permitirían establecer una estrategia amigable con el ambiente, al limitar parcial o totalmente el uso excesivo de fertilizantes de síntesis química en modelos de producción de agricultura sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y material vegetal

El trabajo se desarrolló en el primer semestre de 2022 en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba, Colombia (8°47'3" N y 75°51'51"4 S; 14 m.s.n.m.) bajo condiciones controladas en casa de vegetación, con una humedad relativa del 65 % y temperatura de 30°C en promedio. Se utilizó el genotipo de stevia L-102 procedente del banco de germoplasma de stevia de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba (Rodríguez-Paez *et al.*, 2023), y de berenjena la variedad C-015, de semillas cultivadas comercialmente por pequeños productores en la región caribe (Cantero *et al.*, 2015). Para ambas especies, se seleccionaron plántulas de 15 cm de altura con 20 días de edad fisiológica, las cuales fueron transferidas a bolsas con capacidad de 5 kg, que contenían sustrato mezclado con suelo de textura arcillo-limosa y arena (4:1), con las características químicas que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características químicas, del sustrato de *Limnospira maxima*, empleado para la siembra de plántulas de stevia L-102 y berenjena C-015

pH	C.O	S	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cu	Fe	Mn	B
1:1	%	mg kg ⁻¹		cmol(+) kg ⁻¹					mg kg ⁻¹		
6.34	0.75	16.4	36.0	2.91	1.36	0.46	0.20	0.69	12.9	14.8	0.32

*C.O = carbono orgánico; S = azufre; P = fósforo; Ca²⁺ = calcio; Mg²⁺ = magnesio; K⁺ = potasio; Na⁺ = sodio; Cu = cobre; Fe = hierro; Mn = manganeso; B = boro.

Cultivo semi-continuo y preparación del extracto de *Limnospira maxima*

La cepa de *Limnospira maxima* (sinon. *Arthrospira maxima* Setchell y Gardner, 1917) (Nowicka-Krawczyk *et al.*, 2019), provino de cultivos de la Universidad de Córdoba, registrada en GenBank con arreglo a OR195505.1 (Pineda *et al.*, 2023); se cultiva en un sistema abierto a la

intemperie en estanque tipo Raceway en medio de cultivo Jourdan estándar. La biomasa cosechada, se secó al ambiente a 30 °C y se disolvió en un solvente polar hasta completar con agua destilada en una relación de peso/volumen, de acuerdo a las concentraciones establecidas en los tratamientos. Finalmente, se ubicó la solución del extracto en un sonicador (Fisherbrand™ Sonicator 120, USA) a 0.5 ciclos con una

amplitud del 80 % durante 10 segundos, con la finalidad de emitir ondas ultrasónicas que permitieron ocasionar lisis celular y homogeneizar las mezclas.

Diseño experimental y tratamientos

Se estableció un diseño completamente al azar, con 4 tratamientos y 4 repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales (UE). Cada UE constó de 5 plántulas, con una población total de 80 plantas, en ambos experimentos. Los tratamientos consistieron en diferentes concentraciones del extracto de *Limnospira maxima* (0, 4, 8, y 12 mg mL⁻¹), siendo el tratamiento control la ausencia del extracto. Las concentraciones se prepararon a partir de una concentración estándar (CE) de 40 mg mL⁻¹. Se realizaron tres aplicaciones (15, 30 y 45 días después del transplante, DDT) durante la fase inicial de crecimiento, con un volumen de la solución de 100 mL.

VARIABLES DEPENDIENTES.

Parámetros de intercambio gaseoso. A los 60 DDT se midió el intercambio de gaseoso en hojas completamente expandidas y sanas ubicada en el estrato medio de ambas especies. Para ello se usó un analizador de gases al infrarrojo de sistema abierto (LI-6800, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EE. UU.), tal como lo describe Rodríguez-Paez *et al.* (2023). Los principales indicadores fueron fotosíntesis neta AN ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentración interna de CO₂ Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) y eficiencia instantánea en el uso del agua EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las lecturas se realizaron entre las 09:00 y las 11:00 a. m., con una concentración de referencia de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, un flujo de aire de 500 $\mu\text{mol s}^{-1}$, temperatura de la cámara foliar de 30 °C y radiación fotosintéticamente activa (RFA) de 800 $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Fluorescencia de la clorofila *a*. En hojas adaptadas a la luz, se aplicó un pulso de luz blanca de saturación de 6000 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para lograr la máxima fluorescencia adaptada a la luz (Fm'), y se aplicó una iluminación de rojo lejano para medir la fluorescencia inicial adaptada a la luz (Fo'). Los principales indicadores fueron la tasa de transporte de electrones ETR ($\mu\text{mol e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la extinción fotoquímica (qP). Además, se evaluó una vía alternativa de electrones utilizando la relación ETR/A_N. La fluorescencia en hojas adaptadas a la luz se determinó con un cabezal de cámara de fluorescencia integrado al analizador de gases al infrarrojo descrito en el intercambio gaseoso.

Caracteres biométricos y distribución de biomasa. Se midió largo por ancho de todas las hojas en *S. rebaudiana* y *S. melongena* para la estimación del área foliar de acuerdo al modelo propuesto por Hernández-Fernández *et al.* (2021) y Lima de Oliveira *et al.* (2015), respectivamente; la altura de planta se determinó como la altura desde la base del suelo hasta el ápice de la última hoja de las plantas y la distribución de biomasa se determinó cuantificando la masa seca de cada órgano (raíz, tallo y hojas) respecto a la masa seca total de la planta.

Análisis estadístico

Teniendo en cuenta el cumplimiento de los supuestos del modelo, las variables dependientes se sometieron a una evaluación estadística empleando análisis de varianza de una vía, prueba de comparación de medias de Student-Newman-Keuls (SNK) y las relaciones entre todos los parámetros estudiados mediante el análisis de correlación de Pearson ($p < 0,05$), utilizando el programa SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). La construcción de las gráficas se realizó con SigmaPlot, versión 14.0 (Systat Software; <http://www.sigmaplot.com>).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros de intercambio gaseoso

Los resultados de este trabajo indicaron que las aplicaciones del extracto de *Limnospira maxima* mejoraron significativamente los parámetros de intercambio gaseoso tanto en *S. rebaudiana* como en *S. melongena* ($p < 0,05$) (Figura 1).

Stevia rebaudiana L-102. Los resultados obtenidos indican que las concentraciones del extracto (4, 8, y 12 mg mL⁻¹) produjeron

respectivamente incrementos significativos en la fotosíntesis neta del 30,59 % ($6,20 \pm 0,17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 23,71 % ($5,88 \pm 0,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y 65,79 % ($7,88 \pm 0,14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en comparación con el control (AN = $4,75 \pm 0,11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), (Figura 1A). Estos resultados son similares a los encontrados en lupino amarillo (Shedeed *et al.*, 2022) y espinaca (Xu y Leskovar, 2015), donde las tasas de AN aumentaron gracias a las aplicaciones de extracto de *Spirulina platensis* y *Ascophyllum nodosum*, respectivamente, en comparación con el control.

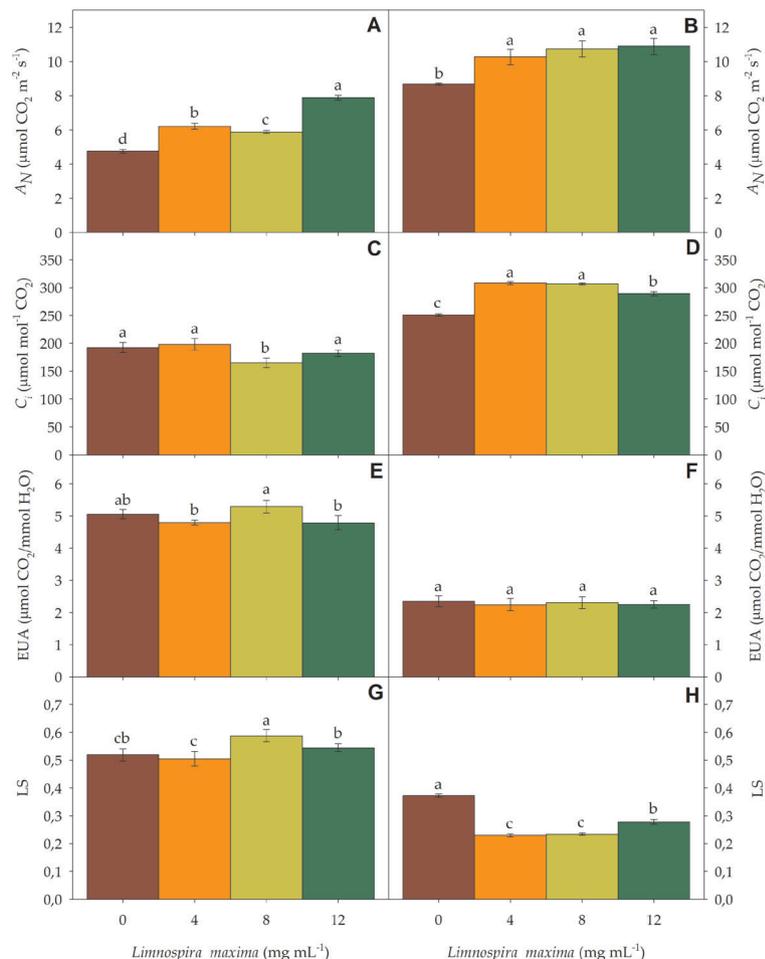


Figura 1. Fotosíntesis neta, A_N (A-B), concentración interna de CO_2 , C_i (C-D), eficiencia instantánea en el uso del agua, EUA (E-F) y límite estomático, LS (G-H), medidos en *Stevia rebaudiana* L-102 (A, C, E, G) y *Solanum melongena* C-015 (B, D, F, H) en función de las concentraciones del extracto de *L. maxima*. Letras distintas sobre las barras muestran diferencias significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Student-Newman-Keuls (SNK) ($p < 0,05$). Los valores denotan la media \pm desviación estándar. $n = 4$.

Los valores de C_i no mostraron una tendencia clara, lo que sugeriría que el aumento de las tasas de A_N en función de las concentraciones del extracto de *L. maxima* no serían una consecuencia de la concentración interna del CO_2 , sino una respuesta más influenciada por la conductancia estomática (Figura 1C). En este sentido, la cantidad de CO_2 que una planta puede asimilar en función de la concentración interna en la hoja (C_i) podría determinar su eficiencia de carboxilación. Así, se observó que las plantas al ser tratadas con el extracto tuvieron una mayor asimilación de CO_2 , pero no incrementaron la acumulación interna de CO_2 (C_i) en comparación con las plantas no tratadas. Lo anterior respuesta en la C_i , indica una mejor eficiencia de las células estomáticas en el proceso de carboxilación (Yang *et al.*, 2023).

La eficiencia instantánea en el uso del agua (EUA), mostró valores relativamente similares entre los tratamientos, aunque los valores mas altos de esta eficiencia se presentaron con la concentración intermedia del extracto ($5,29 \pm 0,19 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 1E). En ese sentido, las plantas al ser tratadas con el extracto, pudieron regular sus estomas para ajustar su tasa de transpiración al mínimo y aumentar la EUA al máximo (Ren *et al.*, 2023). Además, la alta EUA estuvo influenciada, probablemente, por una respuesta estomática rápida.

Es probable que la apertura estomática sea la causa del aumento de las tasas de A_N , porque las concentraciones del extracto incrementaron las tasas de conductancia estomática (valores no mencionados en este estudio) en comparación con el control. Los valores del límite estomático (LS) están por encima de 0,5, lo que demostraría que las plantas tratadas, presentaron una regulación estomática superior al control (Figura 1G).

Por tanto, la disminución de C_i en función de los valores ideales de la LS en las plantas tratadas, posiblemente estén relacionadas con una mayor tasa de fijación de CO_2 y altas tasas de A_N (Chen *et al.*, 2023).

Solanum melongena C-015. En esta especie, todas las concentraciones del extracto incrementaron significativamente ($p < 0,05$), las tasas de A_N en comparación con las plantas control, en un 18,25 % (4 mg mL^{-1}), 3,65 % (8 mg mL^{-1}) y 25,46 % (12 mg mL^{-1}) (Figura 1B). Estos incrementos por efecto de la aplicación del extracto pudieron alcanzarse, posiblemente, porque las cianobacterias incluyen en su composición química compuestos bioactivos, como los nutrientes, debido al aporte de un contenido elevado de nitrógeno, fósforo, potasio y azufre, que actuarían como cofactores de enzimas y proteínas, que, al estar involucrados en la ruta metabólica de la síntesis de fotoasimilados, podrían estimular eficientemente las tasas de A_N (Mutale-joan *et al.*, 2020; Alharbi *et al.*, 2023).

La respuesta de la C_i fue significativo en esta especie, porque presentó una mayor disponibilidad del CO_2 en las células estomáticas y mejoró la eficiencia fisiológica para realizar A_N en función de las concentraciones del extracto en un 22,83 % ($308,12 \pm 2,37 \mu\text{mol mol}^{-1}$), 22,20 % ($306,53 \pm 1,82 \mu\text{mol mol}^{-1}$) y 15,18 % ($288,94 \pm 3,56 \mu\text{mol mol}^{-1}$) superior que el control, lo que probablemente sea una consecuencia de una mayor conductancia estomática y menor limitación del flujo interno del CO_2 (Figura 1D). Es posible que esta respuesta esté relacionada con un aporte significativo de K^+ que es esencial para la regulación de las células estomáticas, favoreciendo la eficiencia en la carboxilación, dado que un menor consumo del CO_2 incrementaron las tasas de A_N (Gerjes y Elsadany, 2021; Yang *et al.*, 2023).

Respecto al comportamiento del EUA, no se observaron diferencias significativas en este parámetro ($p < 0,05$) (Figura 1F). Esto permite inferir, que la maximización de las tasas de A_N por efecto de las concentraciones del extracto, estuvieron influenciadas por la C_i , lo que se confirmaría con los valores de la LS, que están por debajo de 0,5, indican una mayor acumulación del CO_2 fijado en las células estomáticas para ser usado en el ciclo de Calvin-Benson (Yang *et al.*, 2023) (Figura 1H).

Fluorescencia de la clorofila a

El análisis de fluorescencia de clorofila es un método bien establecido que se utiliza

para estimar los cambios funcionales en la fotosíntesis y proporciona información confiable sobre la eficiencia del PSII en hojas a partir de las aplicaciones del extracto, así como estudiar varios parámetros que explicarían el rendimiento del aparato fotosintético. En este trabajo, la respuesta de la *S. rebaudiana* L-102 y *S. melongena* C-015 en función de las concentraciones del extracto de *L. maxima*, mostraron efectos diferencialmente significativos en los indicadores de fluorescencia de la clorofila a ($p < 0,05$) (Figura 2).

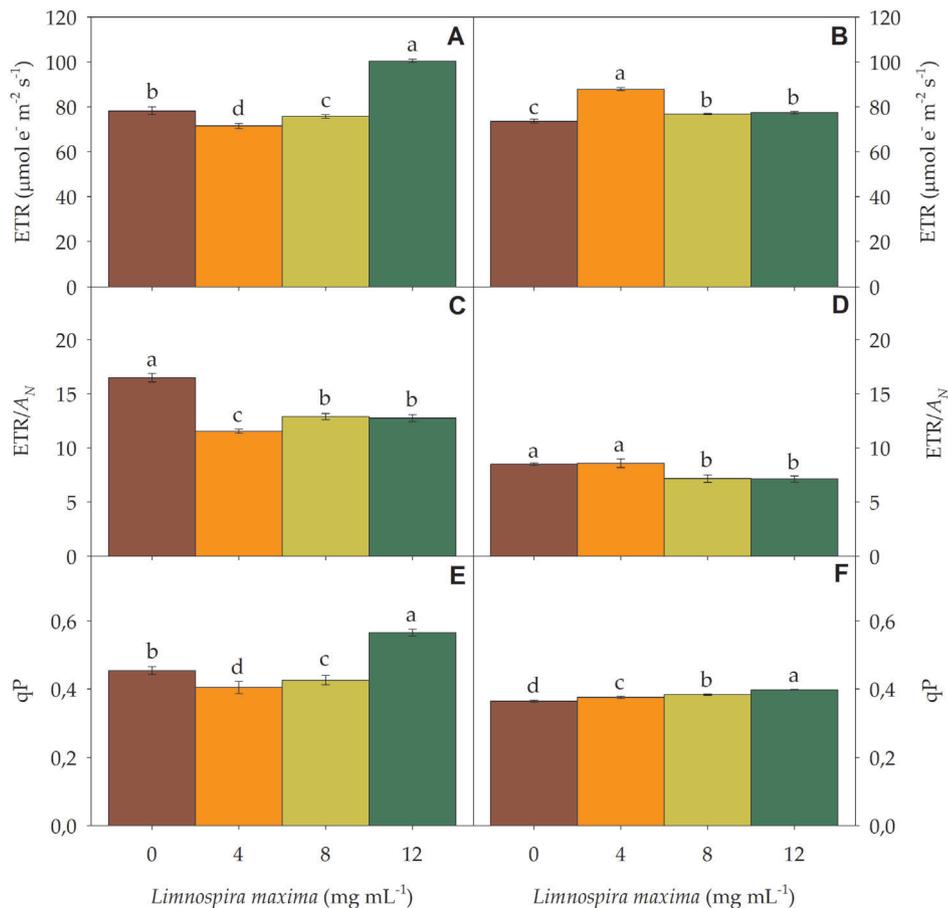


Figura 2. Tasa de transporte de electrones, ETR (A-B), relación tasa de transporte de electrones: fotosíntesis, ETR:AN (C-D) y extinción fotoquímica, qP (G-H), medidos en *Stevia rebaudiana* L-102 (A, C, E) y *Solanum melongena* C-015 (B, D, F) en función de las concentraciones del extracto de *L. maxima*. Letras distintas sobre las barras muestran diferencias significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Student-Newman-Keuls (SNK) ($p < 0,05$). Los valores denotan la media \pm desviación estándar. n = 4.

Stevia rebaudiana L-102. La concentración alta del extracto *L. maxima* incrementó la ETR en un 28,35 % ($100,45 \pm 0,82 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), indicando diferencias significativas respecto a las plantas control ($78,26 \pm 1,81 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ($p < 0,05$) (Figura 2A). No obstante, con las concentraciones de 4 y 8 mg mL⁻¹, respectivamente, se produjo una reducción del 28,35 % ($100,45 \pm 0,82 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y 28,35 % ($100,45 \pm 0,82 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la ETR en comparación con el control. La disminución en la ETR, se podría atribuir a la disminución de la capacidad del metabolismo del carbono (menores Ci) o la baja utilización de ATP y NADPH en la fase no dependiente de la luz de la fotosíntesis (Yu et al., 2023).

La anterior respuesta tiene más sentido cuando relacionamos la ETR y la A_N , para entender si una mayor o menor cantidad de electrones se reflejó en altas o bajas tasas de A_N . La relación ETR/ A_N mostraron valores inferiores del 30,03 % ($11,53 \pm 0,19 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$), 21,76 % ($12,89 \pm 0,27 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$) y 22,58 % ($12,76 \pm 0,31 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$) cuando las plantas recibieron las aplicaciones de las concentraciones del extracto (4, 8 y 12 mg mL⁻¹) comparadas con el control (ETR/ A_N = $16,48 \pm 0,40 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$), respectivamente (Figura 2C). El resultado de la ETR/ A_N indicaría que las plantas fertilizadas con el extracto fueron más eficientes en utilizar los electrones para A_N , ya que requirieron de una menor cantidad de electrones para maximizar su actividad fotosintética (Zheng et al., 2023), caso contrario sucedió con las plantas control, que necesitaron de una mayor cantidad de electrones para producir las mismas tasas de A_N .

Es interesante analizar el valor del coeficiente de la extinción fotoquímica (qP), porque muestra el estado redox del aceptor de electrones primario QA del PSII y el grado de apertura del centro de reacción de PSII, que sugiere que, en cuanto mayor sea el valor de este, asimismo será la actividad de transferencia de electrones de PSII (Chen et

al., 2023; Zheng et al., 2023), por lo que, la concentración alta del extracto provocó un incremento significativo del 24,47 % ($0,566 \pm 0,010$) respecto al control, siendo superior también a la respuesta de las plantas a la concentración baja e intermedia del extracto (Figura 2E).

Solanum melongena C-015. Las concentraciones del extracto de 4, 8, y 12 mg mL⁻¹ provocaron aumentos significativos en la ETR, respectivamente del 19,28 % ($87,91 \pm 0,63 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 4,17 % ($76,78 \pm 0,37 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y 5,12 % ($77,48 \pm 0,55 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en comparación con las plantas control (Figura 2B). Por consiguiente, la respuesta de las plantas en el aumento de la ETR con las concentraciones del extracto, mostraría la eficiencia de la conversión fotoquímica de PSII y la fijación de carbono (Zou y Zhang, 2020). La relación ETR/ A_N mostró valores inferiores del 15,62 % ($7,16 \pm 0,35 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$) y del 16,11 % ($7,12 \pm 0,28 \mu\text{mol e}^-/\mu\text{mol CO}_2$) cuando las plantas recibieron las aplicaciones de las concentraciones intermedia y alta del extracto en comparación con el control, respectivamente, siendo estos tratamientos los que requirieron de una menor cantidad de electrones para maximizar sus tasas de A_N (Figura 2D). Por tanto, la ETR se vio significativamente mejorada por el extracto, lo que sugiere que no se inhibió el transporte de electrones fotosintéticos a través de PSII con las concentraciones del extracto, y por consecuentemente, las cantidades de electrones producidos se relacionaron con las altas tasas de A_N (Zou y Zhang, 2020; Shedeed et al., 2022; Alharbi et al., 2023; Zheng et al., 2023).

La qP siguió el mismo patrón de respuesta que la ETR, donde las concentraciones del extracto incrementaron significativamente la qP en un 2,89 % ($0,376 \pm 0,003$), 5,13 % ($0,384 \pm 0,002$) y 9,02 % ($0,398 \pm 0,001$), frente las plantas que no recibieron aplicación del extracto (Figura 2F). El qP indicaría que las plantas, por efecto de las concentraciones del extracto, aumentaron un alto porcentaje

los centros de reacción del PSII abiertos, y aún más la capacidad del PSII para no oxidarse (Xu y Leskovar, 2015; Zheng *et al.*, 2023).

En general, estos resultados indican que las aplicaciones de *L. maxima* produjeron efectos positivos y potenciales en los indicadores de fluorescencia de la clorofila a. El mantenimiento de una mayor eficiencia de la ETR, ETR/A_N y qP en *S. rebaudiana* y *S. melongena* destacarían la capacidad de las plantas, para aumentar su rendimiento

fotosintético al ser fertilizadas con el extracto de la microalga.

Caracteres biométricos

La actividad fotosintética de la planta está relacionada con la eficiencia que esta puede reflejar en el crecimiento y la producción de biomasa, por lo que, los caracteres biométricos presentaron efectos significativos cuando recibieron aplicaciones con el extracto ($p < 0,05$) (Tabla 2).

Tabla 2. Área foliar y altura de planta en *Stevia rebaudiana* L-102 y *Solanum melongena* C-015 en función de la concentraciones del extracto de *Limnospira maxima*.

Especie	<i>Stevia rebaudiana</i>		<i>Solanum melongena</i>		
	Extracto (mg mL ⁻¹)	Área foliar (cm ²)	Altura de planta (cm)	Área foliar (cm ²)	Altura de planta (cm)
	0	44,99 ± 0,84 b	35,67 ± 1,55 c	638,50 ± 7,23 d	36,10 ± 0,42 d
	4	46,78 ± 1,40 b	55,33 ± 1,25 b	981,87 ± 8,57 c	39,40 ± 0,29 c
	8	95,42 ± 2,43 a	56,42 ± 1,62 b	1069,39 ± 12,41 b	41,73 ± 0,17 b
	12	100,91 ± 2,88 a	68,83 ± 1,44 a	1459,69 ± 12,46 a	44,28 ± 0,34 a
CV %		5,70	5,44	1,01	0,79

* Medias con letras iguales no difieren significativamente según la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) ($p < 0,05$). CV = coeficiente de variación. Los valores denotan la media ± desviación estándar. n = 4.

En *Stevia rebaudiana* L-102, la concentración intermedia y alta del extracto incrementaron significativamente el área foliar (AF) (112,10 % y 124,30 %, respectivamente) y la altura (AP) (58,18 % y 92,99 %, respectivamente) respecto a las plantas no tratadas; por su parte, aunque en berenjena, la respuesta de los caracteres biométricos presentó el mismo patrón, en esta especie, la concentración baja, también superó significativamente el AF y AP al control. Las inoculaciones con las dosis baja, intermedia y alta del extracto incrementaron el AF en 9,14 %, 15,58 % y 22,65 %, respectivamente, y la AP en 53,78 %, 67,49 % y 128,61 %, respectivamente, en comparación con las plantas no tratadas.

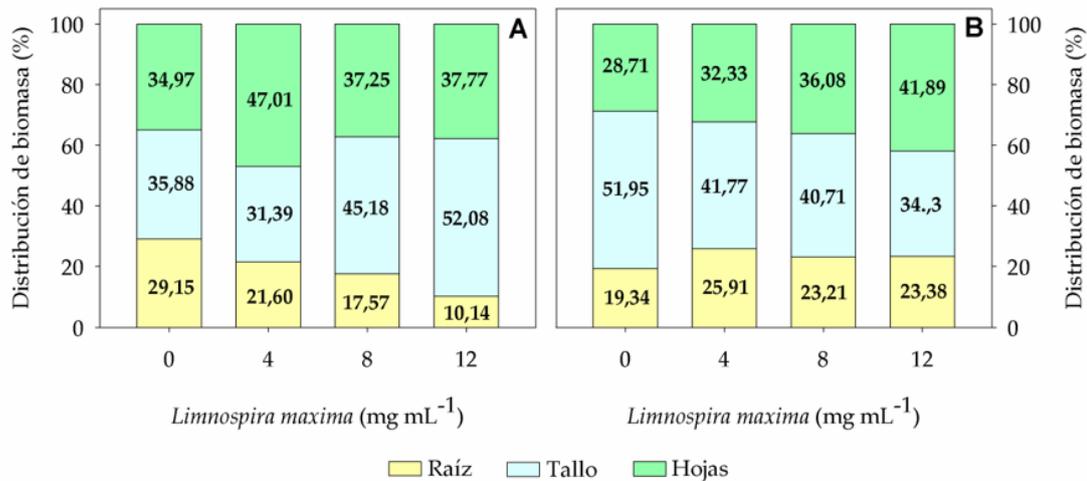
Estos resultados concuerdan a los encontrados en tomate (Supraja *et al.*, 2020), cebolla (Geris y Elsadany, 2021), maíz (Ertani *et al.*, 2019), fresa (Soppelsa *et al.*, 2019) y lechuga (Yassen *et al.*, 2019), donde los indicadores fisiológicos de crecimiento tales como el AF y la AP fueron favorecidas por la aplicación de cianobacterias. De los resultados obtenidos, se comprueba la versatilidad que tuvo la fertilización orgánica con el extracto de *L. maxima* en la expansión foliar y la altura en ambas especies, lo que podría ser una consecuencia de la eficiencia en los parámetros de intercambio gaseoso y fluorescencia de la clorofila, en las plantas tratadas y que fueron discutidos en el acápite anterior.

Distribución de biomasa

Con respecto a la distribución de biomasa en la etapa inicial de crecimiento de ambas

especies, se aprecia que la partición de la biomasa fue diferencial entre estas (Figura 3).

Figura 3. Distribución de biomasa en *Stevia rebaudiana* L-102 (A) y *Solanum melongena* C-015 (B) en función de las concentraciones del extracto de *L. maxima*. n = 4.



Stevia rebaudiana L-102. Siendo la hoja el órgano de interés comercial, se presentó una mayor distribución de biomasa con la concentración baja del extracto, sin embargo, el patrón siguió una mejor distribución hacia el tallo y las hojas para todos los tratamientos, pero la respuesta interesante se interpuso en la concentración baja, media y alta del extracto con una mayor distribución de biomasa hacia las hojas (47,01 %, 37,25 % y 37,77 %, respectivamente), comparadas con el control. Es importante destacar, que la distribución de biomasa hacia las raíces, disminuyó conforme aumentaron las concentraciones del extracto (Figura 3A), lo que sugeriría que el efecto de la fertilización con *L. maxima*, en este estado fisiológico de desarrollo, se concentra en la eficiencia fotosintética de la planta, donde la prioridad temporal es la producción eficiente de tejido fotoasimilatorio (Ertani *et al.*, 2019; Yassen *et al.*, 2019); por tanto, las plantas progresivamente incrementaron la cantidad de fotoasimilados que fueron

necesarios para convertirlos eficientemente en producción foliar, gracias al aprovechamiento en la fijación de carbono (altas tasas de A_N y menor consumo de agua) que se tradujo en una mayor acumulación de masa seca en las hojas (datos no presentados).

Solanum melongena C-015. La mayor distribución de biomasa cuando se aplicó la concentración baja, media y alta del extracto se presentó hacia las raíces (25,91 %, 23,21 % y 23,38 %, respectivamente) y las hojas (32,33 %, 36,08 % y 41,89 %, respectivamente) respecto a las plantas no tratadas (Figura 3B). La distribución de biomasa en las hojas estuvo ligada al incremento de la expansión foliar influenciada por las aplicaciones de las concentraciones del extracto, y, asimismo, incrementó la actividad fotosintética en las hojas a través de la captación de luz, la cual utilizaron eficientemente para convertirla en una mayor producción de biomasa (Shedeed *et al.*, 2022; Alharbi *et al.*, 2023).

No obstante, la respuesta de la distribución de biomasa hacia las raíces en comparación con las plantas no tratadas, pudiera estar relacionado con un aumento en el volumen de raíces exploratorias (Zewail *et al.*, 2021), que favoreció el aprovechamiento y absorción de los nutrientes que aportaría *L. maxima* en el suelo para mantener el crecimiento de las plantas y mejorar los procesos fisiológicos

que promueven el desarrollo de raíces y hojas (Soppelsa *et al.*, 2019; Mutale-joan *et al.*, 2020).

Correlación de variables fisiológicas

Las correlación de Pearson entre las variables cuantitativas aleatorizadas tanto en *S. rebaudiana* L-102 y *S. melongena* C-015 se muestran en la Figura 4.

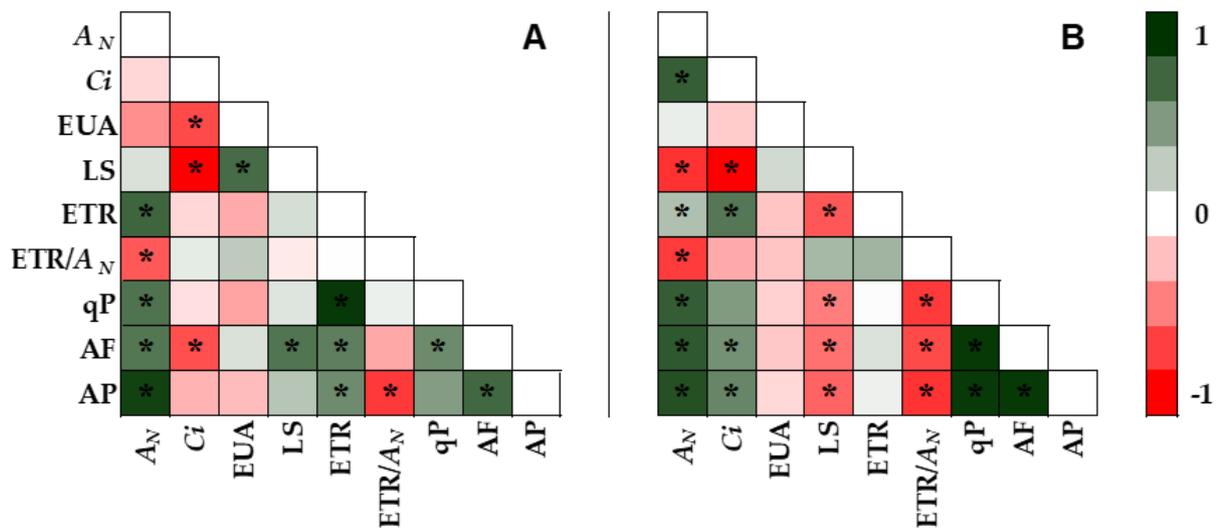


Figura 4. Correlación de Pearson entre los parámetros de intercambio gaseoso, los indicadores de fluorescencia de la clorofila a y las características fenotípicas en *Stevia rebaudiana* L-102 (A) y *Solanum melongena* C-015 (B). Fotosíntesis neta (A_N), Concentración interna de CO_2 (C_i), Eficiencia instantánea en el uso del agua (EUA), Límite estomático (LS), Tasa de transporte de electrones (ETR), Relación ETR y A_N (ETR/A_N), Extinción fotoquímica (qP), Área foliar (AF), Altura de planta (AP). El color verde denota correlación positiva, mientras que el color rojo denota una correlación negativa. Los colores falsos se obtuvieron como leyenda. Los asteriscos indican la correlación significativa ($p \leq 0,05$).

En *Stevia rebaudiana* L-102, el indicador fisiológico más importante fue la fotosíntesis neta, donde se observó una correlación positiva con la tasa de transporte de electrones ($r = 0,76$; $p = 0,0007$), el coeficiente de extinción fotoquímica ($r = 0,69$; $p = 0,003$), el área foliar ($r = 0,68$; $p = 0,0041$) y la altura de la planta ($r = 0,93$; $p < 0,0001$), y negativa con la relación ETR/AN ($r = -0,65$; $p = 0,0063$) en función de los tratamientos estudiados (Figura 4A). La correlación negativa con la relación ETR/AN , indica que las plantas requirieron de una menor cantidad de electrones para incrementar sus

tasas de A_N por efecto de las aplicaciones del extracto (Figura 2C). Asimismo, la concentración interna de CO_2 reveló una correlación negativa con la eficiencia instantánea en el uso del agua ($r = -0,71$; $p = 0,0022$) y el límite estomático ($r = -0,99$; $p < 0,0001$), que explicaría la respuesta del menor consumo de agua y de CO_2 en las plantas tratadas con la microalga (Figura 1E, 1G). En *Solanum melongena* C-015 (Figura 4B), la fotosíntesis neta también mostró ser un indicador fisiológico esencial en este estudio; los tratamientos presentaron una correlación positiva entre la

fotosíntesis neta con la concentración interna de CO₂ ($r = 0,80$; $p = 0,0003$), la tasa de transporte de electrones ($r = 0,31$; $p = 0,002$), el coeficiente de extinción fotoquímica ($r = 0,80$; $p = 0,0002$), el área foliar ($r = 0,82$; $p < 0,0001$) y la altura de la planta ($r = 0,86$; $p < 0,0001$), y negativa con el límite estomático ($r = -0,81$; $p = 0,0002$) y la relación ETR/A_N ($r = -0,77$; $p = 0,0005$), por lo que, estos parámetros se relacionaron directamente con la actividad fotosintética de las plantas (Ertani *et al.*, 2019; Yassen *et al.*, 2019; Shedeed *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona un análisis multivariante que demostró los efectos positivos de *L. maxima* sobre algunos aspectos fisiológicos de las plantas. La fertilización orgánica con 4, 8 o 12 mg mL⁻¹ del extracto, aumentó significativamente las tasas fotosíntesis neta, la tasa de transporte de electrones, el área foliar, la altura de la planta y la distribución de biomasa en raíces y hojas tanto en *S. rebaudiana* L-102 como en *S. melongena* C-015. Los resultados muestran que las cianobacterias podrían utilizarse como estrategia de fertilización orgánica en las etapas iniciales de crecimiento de ambas especies y contribuir al desarrollo de una agricultura sostenible en modelos de producción a pequeña escala. El uso de cianobacterias puede considerarse también como una herramienta biotecnológica que ofrece ventajas agrícolas y ambientales complementarias y/o suplementarias a la fertilización tradicional.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología bajo el programa “Conectando conocimientos: Estrategias integrales para valorizar la biomasa microalgal en beneficio del sector agrícola

colombiano” del Convenio No. 80740-440-2020, que hace parte de la agenda de investigación de la Universidad de Córdoba entre los programas de Ingeniería Agronómica y Acuicultura.

Conflictos de intereses

La preparación y revisión del presente manuscrito contó con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados

REFERENCIAS

- Alharbi, K., Hafez, E., Omara, A. y Nehela, Y. 2023.** Composted Bagasse and/or Cyanobacteria-Based Bio-Stimulants Maintain Barley Growth and Productivity under Salinity Stress. *Plants* 12(9): 1827. <https://doi.org/10.3390/plants12091827>
- Britos, A., Alonso, N. y Álvarez, R. 2022.** Fertilización química con corrección de pH en suelos ácidos y rendimiento por hectárea de *Brachiaria brizantha*. *Revista Veterinaria* 33(2): 130. <https://doi.org/10.30972/vet.3326340>
- Cantero, R., Espitia N., Cardona, C., Vergara, C. y Araméndiz, H. 2015.** Efectos del compost y lombriabono sobre el crecimiento y rendimiento de berenjena *Solanum melongena* L. *Revista de Ciencias Agrícolas* 32(2): 56-67. <https://doi.org/10.22267/rcia.153202.13>
- Chen, Y., Chen, H., Chen, R., Yang, H., Zheng, T., Huang, X. y Fan, G. 2023.** The Impacts of Nitrogen Accumulation, Translocation, and Photosynthesis on Simultaneous Improvements in the Grain Yield and Gluten Quality of Dryland Wheat. *Agronomy* 13(5): 1283. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051283>

- Deviram, G., Mathimani, T., Anto, S., Ahamed, T., Ananth, D. y Pugazhendhi, A. 2020.** Applications of microalgal and cyanobacterial biomass on a way to safe, cleaner and a sustainable environment. *Journal of Cleaner Production* 253: 119770. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119770>
- Ekeuku, S., Chong, P., Chan, H., Mohamed, N., Froemming, G. y Okechukwu, P. 2022.** Spirulina supplementation improves bone structural strength and stiffness in streptozocin-induced diabetic rats. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 12(3): 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2021.07.010>
- Ertani, A., Nardi, S., Francioso, O., Sanchez-Cortes, S., Foggia, M. y Schiavon, M. 2019.** Effects of Two Protein Hydrolysates Obtained From Chickpea (*Cicer arietinum* L.) and *Spirulina platensis* on *Zea mays* (L.) Plants. *Frontiers in Plant Science* 10: 954. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00954>
- Geries, L. y Elsadany, A. 2021.** Maximizing growth and productivity of onion (*Allium cepa* L.) by *Spirulina platensis* extract and nitrogen-fixing endophyte *Pseudomonas stutzeri*. *Archives of Microbiology* 203(1): 169-181. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01991-z>
- Hernández-Fernández, I. A., Jarma-Orozco, A. y Pompelli, M. F. 2021.** Modelos alométricos não destrutivos para estimação da área foliar de stevia: uma análise completa e profunda. *Horticultura Brasileira* 39: 205-215. <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-0536-20210212>
- Mala, R., Ruby, A., Mahalakshmi, R. y Rajeswari, S. 2017.** Agronomic Biofortification of *Amaranthus dubius* with Macro Nutrients and Vitamin A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 225: 012214. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012214>
- Martínez-Vega, J., Villafaña-Estarrón, E. y Escalante, F. 2022.** Comparative Study of the Efficiency of Additives in the Extraction of Phycocyanin-C from *Arthrospira maxima* Using Ultrasonication. *Molecules* 28(1): 334. <https://doi.org/10.3390/molecules28010334>
- Mógor, Á., De Oliveira, J., Mógor, G. y Bocchetti, G. 2018.** Bioactivity of Cyanobacterial Biomass Related to Amino Acids Induces Growth and Metabolic Changes on Seedlings and Yield Gains of Organic Red Beet. *American Journal of Plant Sciences* 09(05): 966-978. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.95074>
- Muratova, A., Gorelova, S., Golubev, S. y Gins, M. 2023.** Rhizosphere Microbiomes of *Amaranthus* spp. Grown in Soils with Anthropogenic Polyelemental Anomalies. *Agronomy* 13(3): 759. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030759>
- Mutale-joan, C., Redouane, B., Najib, E., Yassine, K., Lyamlouli, K., Laila, S., Zerroual, Y., y Hicham, E. 2020.** Screening of microalgae liquid extracts for their bio stimulant properties on plant growth, nutrient uptake and metabolite profile of *Solanum lycopersicum* L. *Scientific Reports* 10(1): 2820. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59840-4>
- Nowicka-Krawczyk, P., Mühlsteinová, R. y Hauer, T. 2019.** Detailed characterization of the *Arthrospira* type species separating commercially grown taxa into the new genus *Limnospira* (Cyanobacteria). *Scientific Reports* 9(1): 694. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36831-0>
- Lima de Oliveira, R. L., Robson Moreira, A., Vanderlane Albuquerque da Costa, A., Castro de Souza, L., Souza Lima, L. G. y Lima da Silva, R. T. 2015.** Modelos de determinação não destrutiva de área foliar de feijão caupi *Vigna unguiculata* (L.). *Global Science and Technology* 8(2): 17-27

- Olorunwa, O., Adhikari, B., Shi, A. y Barickman, T. C. 2022.** Screening of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes for waterlogging tolerance using morpho-physiological traits at early growth stage. *Plant Science* 315: 111136. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111136>
- Orona-Navar, A., Aguilar-Hernández, I., Nigam, K. D. P., Cerdán-Pasarán, A. y Ornelas-Soto, N. 2021.** Alternative sources of natural pigments for dye-sensitized solar cells: Algae, cyanobacteria, bacteria, archaea and fungi. *Journal of Biotechnology* 332, 29-53. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.013>
- Pineda-Rodriguez, Y., Pompelli, M., Jarma-Orozco, A., Rodríguez, N. y Rodríguez-Paez, L. 2023.** A New and Profitable Protocol to DNA Extraction in *Limnospira maxima*. *Methods and protocols* 6(4): 62. <https://doi.org/10.3390/mps6040062>
- Ren, H., Xu, S., Zhang, F., Sun, M. y Zhang, R. 2023.** Cultivation and Nitrogen Management Practices Effect on Soil Carbon Fractions, Greenhouse Gas Emissions, and Maize Production under Dry-Land Farming System. *Land* 12(7): 1306. <https://doi.org/10.3390/land12071306>
- Rodriguez-Paez, L., Jimenez-Ramirez, A., Pompelli, M., Pineda-Rodriguez, Y., Jarma-Orozco, A., Jaraba-Navas, J., Aramendiz-Tatis, H., Combatt-Caballero, E., Oloriz-Ortega, M. y Rodríguez, N. 2023.** Physiological and Enzymatic Evaluation of Selected Genotypes of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Agronomy* 13(2): 403. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020403>
- Shedeed, Z., Gheda, S., Elsanadily, S., Alharbi, K. y Osman, M. 2022.** *Spirulina platensis* Biofertilization for Enhancing Growth, Photosynthetic Capacity and Yield of *Lupinus luteus*. *Agriculture* 12(6): 781. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060781>
- Soppelsa, S., Kelderer, M., Casera, C., Bassi, M., Robatscher, P., Matteazzi, A. y Andreotti, C. 2019.** Foliar Applications of Biostimulants Promote Growth, Yield and Fruit Quality of Strawberry Plants Grown under Nutrient Limitation. *Agronomy* 9(9): 483. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090483>
- Supraja, K., Behera, B. y Balasubramanian, P. 2020.** Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial Crops and Products*, 151: 112453. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>
- Toribio, A., Suárez-Estrella, F., Jurado, M., López, M., López-González, J. y Moreno, J. 2020.** Prospection of cyanobacteria producing bioactive substances and their application as potential phytostimulating agents. *Biotechnology Reports* 26: e00449. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00449>
- Xu, C. y Leskovar, D. 2015.** Effects of *A. nodosum* seaweed extracts on spinach growth, physiology and nutrition value under drought stress. *Scientia Horticulturae* 183: 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.004>
- Yang, Z., Tan, S., Yang, Q., Chen, S., Qi, C., Liu, X., Liang, J. y Wang, H. 2023.** Nitrogen Application Alleviates Impairments for *Jatropha curcas* L. Seedling Growth under Salinity Stress by Regulating Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activity. *Agronomy* 13(7): 1749. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071749>

- Yassen, A., Essa, E. y Zaghloul, S. 2019.** The role of vermicompost and foliar spray of *Spirulina platensis* extract on vegetative growth, yield and nutrition status of lettuce plant under sandy soil. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 14: 1-7. <https://doi.org/10.22587/rjabs.2019.14.1.1>
- Yu, M., Sun, P., Huang, X., Zha, Z., Wang, X., Mantri, N., Lou, H., Jiang, B., Shen, Z., Sun, Y. y Lu, H. 2023.** Interacting Effects of CO₂, Temperature, and Nitrogen Supply on Photosynthetic, Root Growth, and Nitrogen Allocation of Strawberry at the Fruiting Stage. *Agronomy* 13(5): 1353. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051353>
- Zewail, R., Ali, M., El-Gamal, I., Al-Maracy, S., Islam, K., Elsadek, M., Azab, E., Gobouri, A., ElNahhas, N., Mohamed, M. y El-Desouky, H. 2021.** Interactive Effects of Arbuscular Mycorrhizal Inoculation with Nano Boron, Zinc, and Molybdenum Fertilization on Stevioside Contents of *Stevia rebaudiana*, L.) *Plants. Horticulturae* 7(8): 260. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080260>
- Zheng, X., Zhang, B., Pan, N., Cheng, X. y Lu, W. 2023.** Hydrogen Sulfide Alleviates Cadmium Stress by Enhancing Photosynthetic Efficiency and Regulating Sugar Metabolism in Wheat Seedlings. *Plants* 12(13): 2413. <https://doi.org/10.3390/plants12132413>
- Zou, T. y Zhang, J. 2020.** A New Fluorescence Quantum Yield Efficiency Retrieval Method to Simulate Chlorophyll Fluorescence under Natural Conditions. *Remote Sensing* 12(24): 4053. <https://doi.org/10.3390/rs12244053>