



SOCIBI
Sociedad Científica Internacional
de Biotecnólogos A.C.

World Journal of Bioscience and Biotechnology 2025, 1 (2):58-77

Journal homepage: <https://socibiotech.com/journals/wjbb>



REVIEW

ISSN:3061-8185



Bioestimulantes derivados de *Arthrospira* mejoran la tolerancia de las plantas por cambios drásticos en el ambiente: Una revisión

Biostimulants from *Arthrospira* ameliorate plant tolerance due drastic changes in the environment conditions: A review

Erick Nava-Rodriguez¹ , Rubén Díaz² , Gerardo Díaz-Godínez²

¹Maestría en Biotecnología y Manejo de Recursos Naturales, Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Km 10.5 Autopista Tlaxcala–San Martín Texmelucan, 90120, San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, Mexico.

²Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Km 10.5 Autopista Tlaxcala–San Martín Texmelucan, 90120, San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, Mexico.



Gerardo Díaz-Godínez
diazgdo@hotmail.com

ABSTRACT

The biostimulants are essential tools to ameliorate growth and tolerance of crops against frosts, extreme heat, drought, salinity and nutrient deficiency. The genus *Arthrospira* is being investigated for the biochemical composition (aminoacids, polysaccharides, antioxidants, vitamins, phytohormones and polyamines) that promote plant metabolism and growth. These substances participate in different metabolic pathways and help plants to recover due drastic changes in the

environment conditions. The biostimulants mechanism of action changes because of the type of microorganism, substance amount, way to dosify, soil type and crop. The high-performance phenotyping allows the accurately evaluation of biostimulants direct effects. The biostimulant dosification from *Arthrospira* genus is presented as strategy to contribute in agriculture sustainability and food security.

Keywords: *Arthrospira*, biostimulants, drought, salinity, sustainability.

RESUMEN

Los bioestimulantes son herramientas esenciales para mejorar el crecimiento y tolerancia de los cultivos agrícolas ante desafíos como heladas, calor extremo, sequía, salinidad y falta de nutrientes. El género *Arthrospira* es investigado por su composición bioquímica (aminoácidos, polisacáridos, antioxidantes, vitaminas, fitohormonas y poliaminas) que promueven el metabolismo y crecimiento de las plantas. Dichas sustancias participan en diferentes vías metabólicas y ayudan a las plantas a recuperarse por cambios drásticos en las condiciones del ambiente. El mecanismo de

acción de los bioestimulantes cambia por el tipo de microorganismo, cantidad de sustancia, forma de dosificación, tipo de suelo y cultivo agrícola. La fenotipificación de alto rendimiento permite evaluar de forma precisa los efectos directos de los bioestimulantes. La dosificación de bioestimulantes derivados del género *Arthrospira* se presenta como estrategia para contribuir en la sostenibilidad de la agricultura y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: *Arthrospira*, bioestimulantes, salinidad, sequía, sostenibilidad.

Received: 8 October 2025 / Received in revised form: 8 November 2025 / Accepted: 28 November 2025 / Published online: 3 December 2025.

<https://doi.org/10.29267/wjbb.2025.1.2.58-77>

1. Introducción

Las cianobacterias se han utilizado para la producción de biofertilizantes (Hernández-Reyes *et al.*, 2019), formulación de bioestimulantes (Arahou *et al.*, 2023) y biorremediación del ambiente (Cepoi & Zinicovscaia, 2020). *Arthrospira* ha sido uno de los géneros dominantes en los estudios más recientes, especialmente *A. platensis* (El Arroussi *et al.*, 2016).

Los bioestimulantes pueden ser definidos como "microorganismos o sustancias cuya función estimula los procesos de nutrición de las plantas independientemente del contenido de nutrientes del producto, con el único objetivo de mejorar una o más de las siguientes características de la planta: tolerancia al estrés abiótico, disponibilidad de los nutrientes y/o eficiencia en el uso de nutrientes o requisitos de calidad" (European Commission Regulation, 2019). Los bioestimulantes pueden ser clasificados en las siguientes categorías: ácidos orgánicos (húmicos o fúlvicos), hidrolizados de proteínas, extractos de plantas o algas, biopolímeros (quitosano), compuestos inorgánicos (cobalto o silicio) y microorganismos promotores del crecimiento (micorrizas, bacterias fijadoras de nitrógeno o bacterias solubilizadoras de fósforo) (Bhupenchandra *et al.*, 2020).

Los bioestimulantes son aplicados en forma de biomasa fresca o seca, extractos, medio de cultivo restante o sobrenadante y suspensiones (Gitau *et al.*, 2021). El acondicionamiento de semillas, riego directo al suelo o riego foliar son los tipos de dosificación que se han utilizado en distintos cultivos agrícolas. El ciclo fenológico de los cultivos es influenciado por condiciones bióticas y abióticas. Las condiciones bióticas son causadas por otros organismos vivos, incluidos insectos, bacterias, hongos y plantas que afectan el desarrollo y la productividad agrícola. Las condiciones abióticas son provocadas por los factores climáticos, edáficos y fisiográficos del entorno (Verma, 2016). Las temperaturas no óptimas, sequía, salinidad, y baja fertilidad del suelo son las condiciones abióticas más importantes que limitan la productividad agrícola. La sequía reduce los rendimientos de los cultivos agrícolas hasta en un 94% (Farooq *et al.*, 2009). La falta de agua afecta la capacidad de intercambiar gases, lo que conduce a una fotosíntesis y evapotranspiración deterioradas, simultáneamente provoca una incapacidad para absorber nutrientes y reduce la biomasa vegetal generada (Kalu *et al.*, 2018). La salinidad del suelo afecta el crecimiento y calidad nutricional al inducir un efecto osmótico y tóxico debido a la presencia de algunos iones en altas concentraciones (Colla *et al.*, 2012).

Los modos de acción de los bioestimulantes son difíciles de identificar y aún están bajo investigación (Paul *et al.*, 2019). Pueden actuar directamente sobre la fisiología y metabolismo de la planta mejorando las condiciones del suelo. Son capaces de modificar algunos procesos moleculares que permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes de los cultivos, estimular el desarrollo de las plantas y regular el daño ocasionado por cambios drásticos en las condiciones del ambiente mejorando el metabolismo primario y secundario (Yakhin *et al.*, 2017). La multidireccionalidad de los bioestimulantes contribuye en la regulación de genes o vías metabólicas, mayor crecimiento, mayor rendimiento, mejor calidad, más absorción de los nutrientes, mayor tolerancia ante estrés abiótico y más vida de anaquel de los productos cosechados (Du Jardin *et al.*, 2015; Yakhin *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2024). La fenotipificación de alto rendimiento es un enfoque útil para plantear una hipótesis y comprender el mecanismo de los bioestimulantes (Dalal *et al.*, 2019). Esta revisión describe los bioestimulantes, formas de

dosificación y efectos bajo diferentes condiciones abióticas en distintos cultivos agrícolas utilizando especies del género *Arthrospira*.

2. *Arthrospira* y su potencial bioestimulante

El género *Arthrospira* es investigado por el potencial que presenta para incrementar la producción de cultivos, contribuir a la sostenibilidad agrícola y seguridad alimentaria (Komárek *et al.*, 2014). La Tabla 1 muestra las distintas sustancias bioestimulantes que se pueden encontrar en especies del género *Arthrospira*.

Tabla 1. Aminoácidos, polisacáridos y vitaminas en diferentes especies de *Arthrospira*.

Table 1. Amino acids, polysaccharides and vitamins from *Arthrospira* species.

Sustancia bioestimulante	Concentración en peso seco	Referencia
Ácido glutámico	12.60 %	
Leucina	10 %	
Arginina	9.50 %	
Alanina	9.50 %	
Ácido aspártico	8.60 %	
Valina	7.10%	Becker, 2007;
Isoleucina	6.70 %	Raposo <i>et al.</i> , 2013;
Treonina	6.20%	Shebis <i>et al.</i> , 2013;
Glicina	5.70%	Mišurcová <i>et al.</i> ,
Fenilalanina	5.30 %	2014;
Tirosina	5.30%	El Arroussi <i>et al.</i> ,
Lisina	5.10 %	2016;
Serina	5.10 %	Dmytryk &
Prolina	4.20 %	Chojnack, 2018;
Metionina	2.90 %	Koyande <i>et al.</i> ,
Histidina	2.20 %	2019;
Triptófano	1.40 %	Llewellyn <i>et al.</i> ,
Cisteína	0.90 %	2019;
Ácido urónico	7 %	Rachidi <i>et al.</i> , 2020
Sulfatos	5-20 %	
α-tocoferol (E)	50-190 mg/kg	
Tiamina (B1)	34-50 mg/kg	
Riboflavina (B2)	30-46 mg/kg	
Ácido pantoténico (B5)	4.6- 25 mg/kg	
Piridoxina (B6)	5-8 mg/kg	
Ácido fólico (B9)	0.5 mg/kg	

La biomasa, extractos o hidrolizados proteicos de *A. platensis* permiten que la germinación y características fisiológicas (tamaño de raíces, grosor del tallo, área foliar, altura de la planta, etc.) sean beneficiadas (Tabla 2). Los aminoácidos, polisacáridos, fitohormonas, fenoles, antioxidantes, vitaminas o poliaminas provocan diversas respuestas metabólicas (mayor absorción de nutrientes, aumento de la respiración, mayor fotosíntesis, incremento de la

producción de clorofila y síntesis de ácidos nucleicos) (Chiaiese *et al.*, 2018; Chanda *et al.*, 2019). Actualmente la diversidad de estas moléculas biológicamente activas se comercializa como hidrolizados proteicos en su mayoría (Santini *et al.*, 2021).

Tabla 2. Bioestimulantes derivados de *Arthrospira* en cultivos agrícolas.

Table 2. Biostimulants from *Arthrospira* in agriculture crops.

Cultivo agrícola	Resultados (↑ aumento)	Referencia
Frijol mungo, amaranto y tomate	Contenido de nutrientes↑	Anitha <i>et al.</i> , 2016
Berenjena	Tamaño↑	Dias <i>et al.</i> , 2016
Trigo	Número de granos↑	Michalak <i>et al.</i> , 2016
Lechuga	Ácido ascórbico↑ Clorofila ↑	Silva <i>et al.</i> , 2017
Papaya	Crecimiento↑	Guedes <i>et al.</i> , 2018
Pepino	Peso fresco↑	
Betabel	Clorofila ↑	Mógor <i>et al.</i> , 2018a
Lechuga	Espermidina↑	Mógor <i>et al.</i> , 2018b
Cardo	Contenido de aceite esencial↑ Longitud↑	Amer <i>et al.</i> , 2019
Rábano	Peso fresco↑ Clorofila↑	Godlewska <i>et al.</i> , 2019
Fresa	Hierro y Silicio↑	Soppelsa <i>et al.</i> , 2019
Trigo y cebada	Germinación↑	Akgül <i>et al.</i> , 2019
Algodón	Contenido de fitohormonas↑ Contenido de pigmentos↑	Yanni <i>et al.</i> , 2020
Petunia	Tolerancia a salinidad↑	Bayona-Morcillo <i>et al.</i> , 2020
Cebolla	Rendimiento y calidad↑	Geries <i>et al.</i> , 2021
Algodoncillo	Germinación↑	Bahmani <i>et al.</i> , 2021
Chile	Crecimiento↑	Samtani <i>et al.</i> , 2025

Los hidrolizados proteicos son mezclas de aminoácidos, fitohormonas, vitaminas y poliaminas que se obtienen con la hidrólisis de residuos animales, vegetales o microorganismos. La hidrólisis puede ser química (ácida o alcalina), térmica o enzimática (Colla *et al.*, 2015a). Estos hidrolizados incrementan la actividad de las hormonas (auxinas y giberelinas), promueven el crecimiento de la raíz y el tallo, y aumentan la productividad agrícola (Colla *et al.*, 2014; Lucini *et al.*, 2015). Pueden aplicarse al suelo o vía foliar para incrementar la absorción de macronutrientes y micronutrientes (Colla *et al.*, 2015b; Halpern *et al.*, 2015). La arquitectura de la raíz (densidad, longitud y número de raíces laterales) se ha utilizado como referente para

evaluar el incremento de la disponibilidad o absorción de nutrientes (Colla *et al.*, 2015b; Du Jardin *et al.*, 2015).

Los polisacáridos presentes en la pared celular del género *Arthrospira* son excretados como estructuras definidas (vainas, cápsulas o zarcillos), y se liberan como mucílago (Rossi & De Philippis, 2016). Son conocidos por participar en distintas vías metabólicas, por ser una excelente fuente bioestimulante para la mayoría de los cultivos, y facilitar la protección ante factores de estrés bióticos o abióticos (Rachidi *et al.*, 2020).

Los fenoles son un tipo de antioxidante que tienen gran importancia debido a su capacidad para eliminar radicales libres (Wong *et al.*, 2013). Son una de las clases más importantes de antioxidantes naturales. Participan en la germinación y latencia de las semillas, actúan como pantallas contra la radiación UV dañina y como pigmentos para atraer agentes dispersores de semillas y polinizadores. Los compuestos fenólicos producidos por *Arthrospira* incluyen fitoroglucinol, ácido cumárico, ácido ferúlico y apigenina (Andrade *et al.*, 2018).

Las auxinas y citoquininas están involucradas en varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas (Woodward & Bartel, 2005). Las auxinas participan en el fototropismo y gravitropismo, en el crecimiento y desarrollo de las raíces, la división celular, elongación y presión de turgencia (Muday & Murphy, 2002). Las citoquininas están involucradas en el desarrollo de raíces y brotes, senescencia de las hojas, movilización de nutrientes, ruptura de la latencia de los brotes, germinación de las semillas y desempeñan un papel fundamental en la división celular (Haberer & Kieber, 2002). Las auxinas, citoquininas, ácido abscísico (ABA), giberelinas y etileno se encontraron en extractos de microalgas, los cuales son conocidos por influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Stirk *et al.*, 2013).

El ABA es crucial para regular el cierre estomático, estimular la expresión de genes relacionados con proteínas y deshidrinas abundantes en la embriogénesis tardía y promover la acumulación de osmoprotectores. El ABA y citoquininas son reguladores de la respuesta celular ante estrés abiótico (Lu *et al.*, 2014). Las giberelinas regulan la germinación de semillas, elongación del tallo y desarrollo de flores (Bose *et al.*, 2013). Auxinas y giberelinas actúan de manera sinérgica cuando los niveles de giberelinas se regulan positivamente por los niveles de auxinas. Por otro lado, existen efectos antagónicos entre los niveles de giberelinas y ABA, así como entre los niveles de giberelinas y citoquininas (Tsavkelova *et al.*, 2006).

La dosificación exógena de diferentes reguladores del crecimiento contenidos o liberados puede aumentar la resistencia de las plantas por cambios de las condiciones ambientales al incrementar los niveles de hormonas endógenas. La Tabla 3 presenta las fitohormonas y poliaminas que se encontraron en especies del género *Arthrospira*. Las fitohormonas son moléculas pequeñas que actúan como mensajeros químicos para regular las actividades celulares en los cultivos. Además, estos compuestos pueden influir en procesos metabólicos, incluyendo fotosíntesis, respiración, síntesis de ácidos nucleicos y absorción de nutrientes (Tarraf *et al.*, 2015). Las poliaminas son compuestos formados por nitrógeno encontrados en la mayoría de los grupos taxonómicos de bacterias hasta mamíferos (Du Jardin *et al.*, 2012). Las principales formas de poliaminas son putrescina, espermina y espermidina. La hidrólisis enzimática de *A. platensis* durante cuatro horas resultó en un aumento del 34 % en el contenido

de espermina del hidrolizado en comparación con el extracto no hidrolizado. La aplicación foliar de dicho extracto hidrolizado de *A. platensis* promovió el crecimiento de plántulas de lechuga y aumentó el contenido de espermina en las hojas en un 64 % (Mógor *et al.*, 2018b).

Tabla 3. Fitohormonas y poliaminas reportadas en especies de *Arthrospira*.

Table 3. Phytohormones and polyamines reported in *Arthrospira* species.

Fitohormonas y poliaminas	Concentración en peso seco	Referencia
Trans-zeatina	191.37 ng/g	Kapoore <i>et al.</i> , 2021
Giberelina G4	31.27 ng/g	
1-aminociclopropano-1- ácido carboxílico (ACC)	545.55 ng/g	
Putrecina	0.76 ug/g	
Espermina	3.31 ug/g	
Espermidina	0.67 ug/g	

Los bioestimulantes se aplican principalmente mediante tres formas: tratamiento de semillas, directo al suelo o tipo foliar. Los tratamientos de semillas, acondicionamiento (hidratación controlada mediante inmersión) y bioacondicionamiento (recubrimiento con biomasa de microorganismo), se utilizan para mejorar la germinación y favorecer el metabolismo de las plántulas por la acción de microorganismos (Sharma *et al.*, 2014). La irrigación directa al suelo modifica la estructura del suelo y mejora la disponibilidad o capacidad para absorber los nutrientes (Drobek *et al.*, 2019). Distintos estudios proponen que se estimula el crecimiento y desarrollo de las raíces después de aplicarse extractos o hidrolizados proteicos (Chiaiese *et al.*, 2018). La fertilización foliar en hojas permite el ingreso a través de los estomas, los poros o grietas de la cutícula, aunque los mecanismos exactos aún no se comprenden por completo (Ishfaq *et al.*, 2022). La dosificación foliar mejora el crecimiento y rendimiento al incrementar la fotosíntesis, absorción de nutrientes y tolerancia ante estrés (Bayona-Morcillo *et al.*, 2020). En general, la aplicación foliar se realiza con concentraciones más bajas que para el acondicionamiento de semillas o irrigación al suelo (Santini *et al.*, 2021). Se ha observado que la biomasa, extractos e hidrolizados producen una amplia gama de efectos positivos a menudo interconectados (Alvarez *et al.*, 2021).

Bhupenchandra *et al.* (2020) reportó el modo de acción de los microorganismos y su correlación con las modificaciones fisicoquímicas como: disminución de la peroxidación de lípidos en las membranas, aumento del contenido de clorofila y mejora de las actividades antioxidantes. Los efectos directos son: síntesis de moléculas, incremento de la absorción de nutrientes y recuperación por la variación de las condiciones ambientales. Para los efectos indirectos se encuentran las respuestas por la fijación de nitrógeno o solubilización de fósforo (Kumar *et al.*, 2022; Kumari *et al.*, 2023). Por tanto, se considera que los bioestimulantes (microorganismos o sustancias) causan efectos directos e indirectos (Fig. 1). Los efectos directos (absorción eficiente de nutrientes, regulación de genes o vías metabólicas, estimulación de la fotosíntesis y modulación de la producción de fitohormonas) se presentan en condiciones normales o por los cambios drásticos en las condiciones del ambiente (sequía o salinidad) y los efectos indirectos incluyen la degradación de materia orgánica, mejora de la estructura del suelo o

modulación del microbioma por la actividad bioestimulante que sucede en el metabolismo de las plántulas (Ramakrishnan *et al.*, 2023).

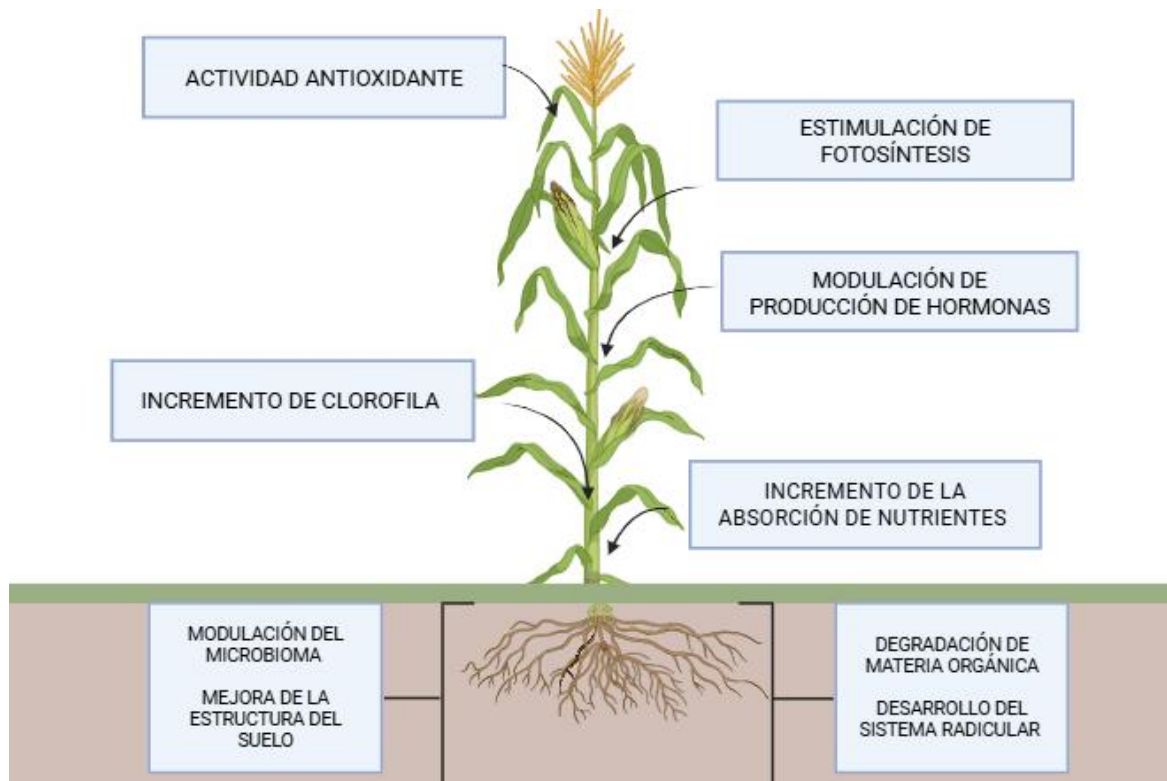


Fig. 1. Efectos directos o indirectos en plántulas o suelo.

Fig. 1. Direct or indirect effects in plantules or soil.

La evaluación de la producción de clorofila o estimulación de la fotosíntesis puede ser analizada mediante distintas técnicas. La fenómica, como herramienta tecnológica, considera la gestión sistemática de características complejas en las interacciones entre genoma y entorno (Houle *et al.*, 2010). Los sistemas de fenotipado de alto rendimiento, que pueden capturar el crecimiento, morfología, color y tasa fotosintética mediante herramientas de imágenes como RGB (Red, Green, Blue image) y fluorescencia de la clorofila (ChlF), son herramientas muy prometedoras para el análisis cuantitativo dinámico del crecimiento y el rendimiento fisiológico de los cultivos (Rahaman *et al.*, 2015; Awlia *et al.*, 2016; Rouphael *et al.*, 2018). La evaluación basada en el número de píxeles del volumen de la planta o área foliar total se correlaciona con el peso fresco y seco de la biomasa vegetal sobre el suelo y, por tanto, se puede utilizar para evaluar el peso fresco de las plantúlas sin cortarlas ni medirlas (Fehér Juhász *et al.*, 2014; Fahlgren *et al.*, 2015). La fluorescencia de la clorofila es una técnica que se utiliza para la medición rápida y no invasiva de la actividad del fotosistema II (PSII). La actividad del PSII es muy sensible a diversos factores bióticos y abióticos, por lo que la técnica se utiliza como indicador rápido de la tasa fotosintética en diferentes etapas de desarrollo o en respuesta a cambios ambientales (Baker, 2008). Los generadores de imágenes integrados en plataformas de fenotipado de alto rendimiento se están convirtiendo en herramientas importantes para la detección rápida de un mejor rendimiento fotosintético y caracterización de la capacidad para captar energía lumínica, lo cual está directamente relacionado con la formación de biomasa y arquitectura vegetal (Tschiersch *et al.*,

2017). La fenotipificación de alto rendimiento es una herramienta eficaz y de alta precisión para la evaluación de efectos directos como la estimulación o producción de clorofila.

3. *Arthrospira* y su acción bioestimulante en distintas condiciones ambientales que afectan la producción agrícola

La falta de nutrientes (macronutrientes y/o micronutrientes), temperaturas extremas (calor o heladas), sequía, salinidad y radiación UV provocan que el rendimiento máximo no suceda (Fig. 2) (He *et al.*, 2018; Lucini *et al.*, 2015). Las bajas temperaturas reducen el metabolismo y retrasan las respuestas fisiológicas en los cultivos. Dicha variación provoca una inhibición de la actividad del fotosistema PSII denominada fotoinhibición. Las temperaturas extremas, salinidad y sequía limitan la producción agrícola en muchas partes del mundo. Las altas temperaturas alteran la síntesis de proteínas, inactivan enzimas y dañan membranas celulares. El rango de temperatura óptima (30 °C a 45 °C) se requiere para integrar la estructura y actividad enzimática. Temperaturas mayores a 45 °C provocan la producción de compuestos tóxicos, como las especies reactivas del oxígeno (ROS), lo que genera oxidación y es una de las consecuencias más frecuentes (Hasanuzzaman *et al.*, 2013).

La sequía afecta en múltiples niveles la producción agrícola, desde cambios morfológicos visibles hasta procesos fisiológicos y bioquímicos. La regulación osmótica ayuda a mantener la presión de turgencia, función estomática y actividades bioquímicas claves necesarias para la fotosíntesis y crecimiento vegetal (Yang *et al.*, 2022). Las ROS se producen como subproductos de procesos metabólicos normales, incluyendo los que ocurren en las mitocondrias, cloroplastos, peroxisomas y membranas plasmáticas. Los niveles de las ROS pueden superar la capacidad de la planta para eliminarlas en condiciones de sequía y provocar así estrés oxidativo. Tal efecto oxidativo daña las membranas celulares, proteínas y ADN. Sin embargo, las ROS también desempeñan un papel en los mecanismos de defensa y la regulación del crecimiento. Las plantas han desarrollado sistemas antioxidantes tanto enzimáticos (ascorbato peroxidasa, catalasa o superóxido dismutasa) como no enzimáticos (ascorbato o glutatión) para regular el daño causado por las ROS y mantener la homeostasis en condiciones adversas.

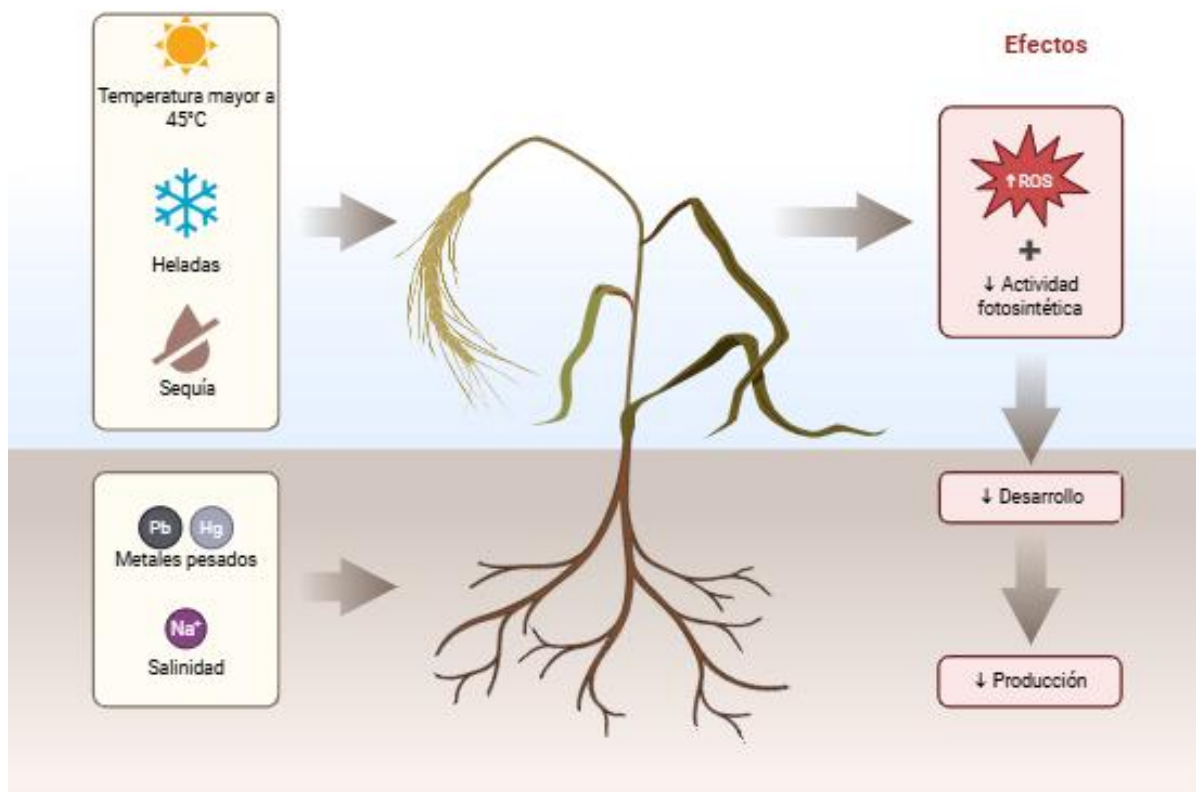


Fig. 2. Condiciones ambientales que provocan daños en los cultivos agrícolas y sus efectos.
Fig. 2. Environment conditions that induce damages on crops and their effects.

La salinidad afecta el metabolismo y crecimiento como consecuencia del cambio osmótico en la célula provocado por las sales. El cloruro de sodio es la sal más abundante en ambientes salinos y resulta tóxica en concentraciones elevadas (Zhao *et al.*, 2021). Provoca diversos retos como la absorción competitiva de calcio, fósforo y potasio, transporte de iones, disponibilidad de micronutrientes y reducción del potencial hídrico. El aumento de los niveles de salinidad se atribuye a diversos factores, como malas prácticas de riego, uso inadecuado de fertilizantes, deforestación y cambio climático (Zhao *et al.*, 2021; FAO, 2022; Fu & Yang, 2023).

Los bioestimulantes pueden utilizarse durante todo el período vegetativo o de forma proactiva, por ejemplo, antes, durante o después de cambios drásticos en las condiciones del ambiente (Drobek *et al.*, 2019). Además, mejoran la biosíntesis de osmolitos, producción de antioxidantes contra las ROS y regulación de las fitohormonas, como el ácido abscísico, moderando la transpiración y evitando pérdidas excesivas de agua. La Tabla 4 presenta los efectos que se obtuvieron con *A. platensis* en condiciones de sequía o salinidad para diferentes cultivos.

Tabla 4. Efecto de la bioestimulación con *A. platensis* en condiciones de sequía o salinidad.
Table 4. *A. platensis* biostimulation effects in drought or salinity conditions.

Tipo de estrés	Cultivo agrícola	Efecto (↑ aumento)	Referencia
----------------	------------------	--------------------	------------

Salinidad	Haba	Fotosíntesis↑ Tasa de respiración↑ Pigmentación↑ Absorción de nutrientes↑ Rendimiento↑	Selem, 2019
Sequía Salinidad	Uva Geranio	Rendimiento↑ Número de flores ↑ Tamaño de raíces ↑ Número de flores↑	Salvi <i>et al.</i> , 2020 Tejada-Ruiz <i>et al.</i> , 2020
Salinidad	Petunia	Longitud y número de hojas↑	Bayona-Morcillo <i>et al.</i> , 2020
Salinidad	Algodoncillo	Peso seco↑ Germinación↑ Tamaño de raíces ↑ Peso seco de raíces tamaño de raíces ↑	Bahmani <i>et al.</i> , 2021
Salinidad	Trigo	Tamaño de raíces ↑ Área foliar↑	Hamouda <i>et al.</i> , 2022
Sequía	Mandarina	Peso fresco y peso seco↑ Eficiencia en uso de agua↑ Rendimiento↑	Elmenofy <i>et al.</i> , 2023
Salinidad	Tomate	vida útil↑ Altura ↑ Área foliar↑ Peso fresco y peso seco↑ Área foliar↑ Rendimiento	Mostafa <i>et al.</i> , 2023
Sequía	Trigo	Vida de anaquel↑ Altura ↑ Área foliar↑ Rendimiento↑ Fotosíntesis↑ Eficiencia en uso de agua↑	Elnajar <i>et al.</i> , 2024

5. Conclusión

El género *Arthrospira* es una opción biotecnológica para la obtención de bioestimulantes capaces de mejorar los rendimientos y calidad de los cultivos agrícolas. Estos efectos se atribuyen a una diversidad de moléculas como: aminoácidos, fitohormonas, polisacáridos, antioxidantes, vitaminas y poliaminas. La caracterización de la biomasa, extractos o hidrolizados proteicos de especies del género *Arthrospira* son de interés para la comunidad científica y empresas comerciales. Distintos trabajos muestran los efectos positivos, incluyendo la mejora de la germinación de semillas, crecimiento de plántulas, floración, tasa fotosintética, eficiencia en el uso de nutrientes y tolerancia a los cambios en las condiciones ambientales, optimizando así la productividad en condiciones normales o por cambios drásticos en el ambiente. La fenotipificación de alto rendimiento es la tecnología más eficiente para analizar matrices

complejas con diferentes grupos de moléculas bioactivas. Basándose en esta novedosa tecnología, se ha propuesto el modo de acción de los bioestimulantes en tres grupos: promotores del crecimiento, mejoradores de daños por cambios en las condiciones ambientales y acción combinada. Sin embargo, comparar los efectos directos e indirectos de los bioestimulantes que se obtienen de diferentes especies o especie de microorganismo sobre diferentes cultivos agrícolas es complicado, porque se utilizan diversos métodos de extracción o formas de dosificación, y se evalúan diferentes parámetros. Por tanto, se recomienda la elaboración de protocolos estandarizados para la validación de los bioestimulantes.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) que ha otorgado una beca a Erick Nava Rodríguez para la realización de estudios de maestría con número de registro 2158924.

Contribución de los autores

Erick Nava Rodríguez: Conceptualización, investigación y redacción-original. Gerardo Díaz Godínez: Análisis formal, redacción-revisión y supervisión. Rubén Díaz: Análisis formal, redacción-revisión, visualización.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Alvarez, A.L., Weyers, S.L., Goemann, H.M., Peyton, B.M. & Gardner, R.D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Res.*, 54 (5), 102200. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Akgül, F. (2019). Effect of *Spirulina platensis* (Gomont) Geitler extract on seed germination of wheat and barley. *Alinteri J. Agri. Sci.*, 34 (2), 148-153. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.639000>
- Andrade, L.M., Andrade, C.J., Dias, M., Nascimento, C.A.O. & Mendes, M.A. (2018). *Chlorella* and *Spirulina* microalgae as sources of functional foods, nutraceuticals, and food supplements; an overview. *MOJ Food Process. & Tech.*, 6 (1), 1-14. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2018.06.00144>
- Anitha, L., Bramari, G.S. & Kalpana, P. (2016). Effect of supplementation of *Spirulina platensis* to enhance the zinc status in plants of *Amaranthus gangeticus*, *Phaseolus aureus* and Tomato. *Adv. Biosci. Biotechnol.* 7 (6), 289-299. <https://doi.org/10.4236/abb.2016.76027>
- Amer, H.M., Marrez, D.A., Salama, A.B., Wahba, H.E. & Khalid, K.A. (2019). Growth and chemical constituents of cardoon plant in response to foliar application of various algal extracts. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 21 (1), 101336. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101336>

- Arahou, F., Lijassi, I., Wahby, A., Rhazi, L., Arahou, M., Wahby, I. (2023). *Spirulina* based biostimulants for sustainable agriculture: yield improvement and market trends. *BioEnergy Research*, 16 (3), 1401-1416. <https://doi.org/1401-1416.10.1007/s12155-022-10537-8>
- Awlia, M., Nigro, A., Fajkus, J., Schmoeckel, S. M., Negrão, S. & Santelia, D. (2016). High-throughput non-destructive phenotyping of traits that contribute to salinity tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *Front. Plant Sci.* 7, 1414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01414>
- Bahmani, J. M., Pilehvar, B., Modarresi, M. & Mohammadi, M. (2021). Performance of algae extracts priming for enhancing seed germination indices and salt tolerance in *Calotropis procera* (Aiton) W.T. Iran J. Sci. Technol. Trans. A Sci. 45 (2), 493-502. <https://doi.org/10.1007/s40995-021-01071-x>
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Bayona-Morcillo, P. J., Plaza, B. M., Gómez-Serrano, C., Rojas, E. & Jiménez Becker, S. (2020). Effect of the foliar application of cyanobacterial hydrolysate (*Arthrospira platensis*) on the growth of *Petunia x hybrida* under salinity conditions. *J. Appl. Phycol.* 32 (6), 4003-4011. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02192-3>
- Becker, E.W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* 25 (2), 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- Bose, S.K., Yadav, R.K., Mishra, S., Sangwan, R.S., Singh, A.K., Mishra, B., Srivastava, A.K. & Sangwan, N.S. (2013). Effect of gibberellic acid and calliterpenone on plant growth attributes, trichomes, essential oil biosynthesis and pathway gene expression in differential manner in *Mentha arvensis* L. *Plant Physiol. Biochem.* 66, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.02.011>
- Bhupenchandra, I., Devi, S.H., Basumatary, A., Dutta, S., Singh, L.K., Kalita, P., Bora, S.S., Devi, S.R., Saikia, A. & Sharma, P. (2020). Biostimulants potential and prospects in agriculture. *International Res. J. of P. and App. Chem.* 21 (14), 20-35. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2020/v21i1430244>
- Cepoi, L. & Zinicovscaia, I. (2020). *Spirulina platensis* as a model object for environment bioremediation studies. *Algal science, technology and medicine.* 1, 629-640. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818305-2.00039-5>
- Chanda, M., Merghoub, N. & El Arroussi, H. (2019). Microalgae polysaccharides: ¿the new sustainable bioactive products for the development of plant bio-stimulants?. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 35 (11), 177 <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2745-3>
- Chakdar, H., Jadhav, S.D., Dhar, D.W. & Pabbi, S. (2012). Potential applications of blue green algae. *J. Sci. Ind. Res.* 71 (1), 13-20.
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, M.C. & Roupael, Y. (2018). Renewable sources of plant biostimulation: Microalgae as a sustainable means to improve crop performance. *Front. Plant Sci.* 9, 1782. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01782>

- Colla, G., Rouphael, Y., Rea, E. & Cardarelli, M. (2012). Grafting cucumber plants enhance tolerance to sodium chloride and sulfate salinization. *Sci. Hortic.* 135, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.023>
- Colla, G., Svecova, E., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Reynaud, H. & Canaguier, R. (2013). Effectiveness of a plant-derived protein hydrolysate to improve crop performances under different growing conditions. *Acta Hortic.* 1009, 175-179. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1009.2>
- Colla, G., Rouphael, Y., Canaguier, R., Svecova, E. & Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Front. Plant Sci.* 5, 448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00448>
- Colla, G., Nardi, S., Cardarelli, M., Ertani, A., Lucini, L. & Canaguier, R. (2015a). Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.* 96, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>
- Colla, G., Rouphael, Y., Di Mattia, E., El-Nakhel, C. & Cardarelli, M. (2015b). Co-inoculation of *Glomus intraradices* and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *J. Sci. Food Agric.* 95 (8), 1706–1715. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6875>
- Dalal, A., Bourstein, R., Haish, N., Shenhar, I., Wallach, R., Moshelion, M., Sciences, P. & Sciences, W. (2019). A high-throughput physiological functional phenotyping system for time and cost-effective screening of potential biostimulants. *BioRxiv.* 525-592. <https://doi.org/10.1101/525592>
- Dias, G. A., Rocha, R. H. C., Araújo, J. L., De Lima, J. F. & Guedes, W. A. (2016). Growth, yield, and postharvest quality in eggplant produced under different foliar fertilizer (*Spirulina platensis*) treatments. *Semin. Agrar.* 37 (6), 3893-3902. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3893>
- Dmytryk, A. & Chojnacka, W. K. (2018). Algae as fertilizers, biostimulants and regulators of plant growth. *Algae biomass: Characteristics and applications.* Springer Int. Pub., 115–122. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74703-3_10
- Drobek, M., Frąć, M. & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance of the quality and yield of horticultural crops and the improvement of plant tolerance to abiotic stress: A review. *Agronomy* 9 (6), 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060335>
- Du Jardin, P. (2012). *The science of plant biostimulants-A bibliographic analysis.* First ed. European Commission.
- Du Jardin, P. (2015). Plant Biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hortic.* 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- El Arroussi, H., El Mernissi, N., Benhima, R., El Kadmiri, I. M., Bendaou, N. & Smouni, A. (2016). Microalgae polysaccharides a promising plant growth biostimulant. *J. Algal. Biomass Utiln.* 7 (4), 55-63.

- Elmenofy, H. M., Hatterman-Valenti, H. M., Hassan, I. F. & Mahmoud, M. A. (2023). Effects of deficit irrigation and anti-stressors on water productivity, and fruit quality at harvest and stored 'Murcott' mandarin. *Horticulturae* 9 (7), 787. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070787>
- Elnajar, M., Aldesuquy, H., Abdelmoteleb, M. & Eltanahy, E. (2024). Mitigating drought stress in wheat plants (*Triticum Aestivum* L.) through grain priming in aqueous extract of *Spirulina platensis*. *BMC Plant Biol.* 24 (1), 233. <https://doi.org/10.1186/s12870024-04905-z>
- European Commission Regulation of the European Parliament and of the Council Laying down. (2019). Rules on the Making Available on the Market of EU Fertilising Products and Amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and Repealing Regulation (EC) No 2003/2003. *Off. J. Eur. Union*, 114.
- Food and Agriculture Organization. (2022). Global Symposium on Salt-Affected Soils: Outcome document (Rome: FAO). <https://doi.org/10.4060/cb9929en>
- Fahlgren, N., Gehan, M. A. & Baxter, I., (2015). Lights, camera, action: high throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Curr. Opin. Plant Biol.* 24, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.02.006>
- Farid, R., Chanda, M., Redouane, B., Mernissi Najib, E., Abderahime, A., Laila, S. & El Arroussi, H. (2019). Effect of microalgae polysaccharides on biochemical and metabolomics pathways related to plant defense in *Solanum lycopersicum*. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 188 (1), 225-240. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2916-y>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. & Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* 29 (1), 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Fehér-Juhász, E., Majer, P., Sass, L., Lantos, C., Csiszár, J. & Turóczy, Z. (2014). Phenotyping shows improved physiological traits and seed yield of transgenic wheat plants expressing the alfalfa aldose reductase under permanent drought stress. *Acta Physiol. Plant.* 92, 663-673. <https://doi.org/10.1007/s11738-013 1445-0>
- Fu, H. & Yang, Y. (2023). How plants tolerate salt stress. *Curr. Issues Mol. Biol.* 45, 5914-5934. <https://doi.org/10.3390/cimb45070374>
- Geries, L.S.M. & Elsadany, A.Y. (2021). Maximizing growth and productivity of onion (*Allium cepa* L.) by *Spirulina platensis* extract and nitrogen-fixing endophyte *Pseudomonas stutzeri*. *Arch. Microbiol.* 203 (1), 169-181. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01991-z>
- Gitau, M., Farkas, A., Balla, B., Ördög, V., Futó, Z. & Maróti, G. (2021). Strain-specific biostimulant effects of *Chlorella* and *Chlamydomonas* green microalgae on *Medicago truncatula*. *Plants.* 10 (6), 1060. <https://doi.org/10.3390/plants10061060>
- Guedes, W.A., Araújo, R.H.C.R., Rocha, J.L.A., Lima, J.F.D., Dias, G.A., Oliveira, Á.M.F.D., Lima, R.F. & Oliveira, L.M. (2018). Production of papaya seedlings using *Spirulina platensis* as a biostimulant applied on leaf and root. *J. Exp. Agric. Int.*, 28 (1), 1-9. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/45053>

- Godlewska, K., Michalak, I., Pacyga, P., Baśladyńska, S. & Chojnacka, K. (2019). Potential applications of cyanobacteria: *Spirulina platensis* filtrates and homogenates in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 35 (6), 80. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2653-6>
- Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T. & Yermiyahu, U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Adv. Agron.* 130, 141-174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00597>
- Haberer, G. & Kieber, J.J. (2002). Cytokinins: New insights into a classic phytohormone. *Plant Physiology*, 128 (2), 354-362. <https://doi.org/10.1104/pp.010773>
- Hamouda, R. A., Shehawy, M. A., Mohy El Din, S. M., Albalwe, F. M., Albalawi, H. M. R. & Hussein, M. H. (2022). Protective role of *Spirulina platensis* liquid extract against salinity stress effects on *Triticum aestivum* L. *Green Process. Synthesis* 11 (1), 648-658. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0065>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M.M., Roychowdhury, R. & Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 14 (5), 9643-9684. <https://doi.org/10.3390/ijms14059643>
- He, M., He, C.Q. & Ding, N.Z. (2018). Abiotic stresses: General defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 9. 1771. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01771>
- Hernández-Reyes, B. M., Rodríguez-Palacio, M.C., Castilla-Hernández, P., Sánchez-Robles, J., Vela-Correa, G & Schettino-Bermúdez, B. (2019). Uso potencial de cianobacterias como biofertilizante para el cultivo de maíz azul en la Ciudad de México. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 10 (1), 13-27.
- Houle, D., Govindaraju, D. R. & Omholt, S. (2010). Phenomics: the next challenge. *Nat. Rev. Genet.* 11, 855-866. <https://doi.org/10.1038/nrg2897>
- Ishfaq, M., Kiran, A., Rehman, H., Farooq, M., Hassan, N., Nadeem, F., Azeem, I., Li, X. & Wakeel, A. (2022). Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture. *Environmental and Experimental Botany*. 200 (10), 104909. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104909>
- Kalu, A., Zewicz, Bosiacki, M. & Spizewski, T. (2018). Influence of biostimulants on the content of macro and micronutrients in broccoli plants exposed to drought stress. *J. Elem.* 23 (1), 287-297. <https://doi.org/10.5601/jelem.2017.22.2.1450>
- Kapoor, R. V., Wood, E. E. & Llewellyn, C. A. (2021). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnol. Adv.* 49, 107754. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107754>
- Komárek, J., Kaštovský, J., Mareš, J. & Johansen, J.R. (2014). Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) using a polyphasic approach. *Preslia* 86, 295-335.
- Koyande, A.K., Chew, K.W., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D.-T. & Show, P.L. (2019). Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Sci. Hum. Wellness* 8 (1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.001>

- Kumar, S., Korra, T., Singh, U.B., Singh, S. & Bisen, K. (2022). Microalgal based biostimulants as alleviator of biotic and abiotic stresses in crop plants. New and Future Develop. in Micro. Biotech. and Bioeng. 9, 195-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85577-8.00013-5>
- Kumari, M., Swarupa, P., Kesari, K.K. & Kumar, A. (2023). Microbial inoculants as plant biostimulants: A Review on risk status. Life. 13 (1), 12. <https://doi.org/10.3390/life13010012>
- Llewellyn, C.A., Kapoore, R.V., Lovitt, R.W., Greig, C., Fuentes-Grünwald, C. & Kultschar, B. (2019). Deriving economic value from metabolites in cyanobacteria. Grand challenges in algae biotechnology. Springer, Switzerland, pp. 535-576. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25233-5_15
- Lu, Y., Tarkowská, D., Turecková, V., Luo, T., Xin, Y., Li, J., Wang, Q., Jiao, N., Strnad, M. & Xu, J. (2014). Antagonistic roles of abscisic acid and cytokinin during response to nitrogen depletion in oleaginous microalga *Nannochloropsis oceanica* expand the evolutionary breadth of phytohormone function. Plant J. 80, 52-68. <https://doi.org/10.1111/tpj.12615>
- Lu, Y. & Xu, J. (2015). Phytohormones in microalgae: A new opportunity for microalgal biotechnology?. Plant Sci. 20, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.01.006>
- Lucini, L., Roupshael, Y., Cardarelli, M., Canaguier, R., Kumar, P. & Colla, G. (2015). The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce growth under saline conditions. Scientia Horticulturae, 182, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.022>
- Michalak, I., Dmytryk, A., Wiecek, P.P., Rój, E., Łęska, B., Górka, B., Messyas, B., Lipok, J., Mikulewicz, M., Wilk, R., Schroeder & G., Chojnacka, K. (2015). Supercritical algal extracts: A source of biologically active compounds from nature. J. Chem. 14 (4), 1562. <https://doi.org/10.1155/2015/597140>
- Michalak, I., Chojnacka, K., Dmytryk, A., Wilk, R., Gramza, M. & Rój, E. (2016). Evaluation of supercritical extracts of algae as biostimulants of plant growth in field trials. Front. Plant Sci. 7, 1591. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01591>
- Mišurcová, L., Buňka, F., Ambrožová, J.V., Machů, L., Samek, D. & Kráčmar, S. (2014). Amino acid composition of algal products and its contribution to RDI. Food Chem. 151, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.040>
- Mógor, Á.F., De Oliveira Amatucci, J., Mógor, G. & Bocchetti de Lara, G. (2018a). Bioactivity of cyanobacterial biomass related to amino acids induces growth and metabolic changes on seedlings and yield gains of organic red beet. Am. J. Plant Sci. 9 (5), 966-978. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.95074>
- Mógor, Á.F., Ördög, V., Lima, G.P.P., Molnár, Z. & Mógor, G. (2018b). Biostimulant properties of cyanobacterial hydrolysate related to polyamines. J. Appl. Phycol. 30 (1), 453-460. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1242-z>
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., El-Sayed, A. E. K. B. (2023). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) tolerance against saline water irrigation. Biomass Convers. Biorefin. 14 (17), 21181-21191. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04460-x>

- Muday, G.K. & Murphy, A.S. (2002). An emerging model of auxin transport regulation. *Plant Cell* 14, 293–299. <https://doi.org/10.1105/tpc.140230>
- Paul, K., Sorrentino, M., Lucini, L.; Rouphael, Y., Cardarelli, M., Bonini, P., Reynaud, H., Canaguier, R., Trtílek, M., Panzarová, K. (2019). Understanding the biostimulant action of vegetal-derived protein hydrolysates by high-throughput plant phenotyping and metabolomics: A case study on tomato. *Front. Plant Sci.* 10, 47. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00047>
- Koyande, A.K., Chew, K.W., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D.T. & Show, P. L. (2019). Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Sci. Hum. Wellness* 8 (1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.001>
- Rachidi, F., Benhima, R., Sbabou, L. & El Arroussi, H. (2020). Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution. *Biotechnol. Reports* 25, e00426. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00426>
- Ramakrishnan, B., Maddela, N.R., Venkateswarlu, K. & Megharaj, M. (2023). Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: A critical view. *Environ. Sci. Adv.* 2 (1), 586–611. <https://doi.org/10.1039/d2va00158f>
- Rahaman, M.M., Chen, D., Gillani, Z., Klukas, C. & Chen, M. (2015). Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Front. Plant Sci.* 6, 619. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00619>
- Raposo, M.F. De J., De Moraes, R.M.S.C. & Bernardo De Moraes, A.M.M. (2013). Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae. *Mar. Drugs* 11 (1), 233–252. <https://doi.org/10.3390/md11010233>
- Rouphael, Y., Spíchal, L., Panzarová, K., Casa, R. & Colla, G. (2018). High throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: ¿from lab to field or from field to lab? *Front. Plant Sci.* 9, 1197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01197>
- Rossi, F., & De Philippis, R. (2016). Exocellular polysaccharides in microalgae and cyanobacteria: Chemical features, role, and genes involved in their biosynthesis. *The Physiology of Microalgae*. 565-590.
- Salvi, L., Niccolai, A., Cataldo, E., Sbraci, S., Paoli, F. & Storchi, P. (2020). Effects of *Arthrospira platensis* extract on physiology and berry traits in *Vitis vinifera*. *Plants* 9, 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants9121805>
- Santini, G., Biondi, N., Rodolfi, L. & Tredici, M.R. (2021). Plant biostimulants from cyanobacteria: An emerging strategy to improve yields and sustainability in agriculture. *Plants*, 10 (4), 643. <https://doi.org/10.3390/plants10040643>
- Samtani, K., Rahmawati, F. A., Pratiwi, I. W., Atuillah, N., Hidayatullah, R. A., Sabiku, D. F., Azizah, M., Prasetyo, H., Suwardi, S., Sulistyono, N. B. E., Bintoro, M. & Adnan, M. R. (2025). Seed vigor improvement of red chili seeds (*Capsicum annuum* L.) using *Spirulina platensis* as seed priming agent. *Agroteknika*, 8 (2), 213-230. <https://doi.org/10.55043/agroteknika.v8i2.456>
- Selem, E. E.S. (2019). Physiological effects of *Spirulina platensis* in salt stressed *Vicia faba* L. *Plants. Egyptian J. Bot.* 59, 185–194. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.3836.1178>

- Sharma, H.S.S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J. R. & Martin, T. (2014). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *J. Appl. Phycol.* 26, 465-490. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9>
- Shebis, Y., Iluz, D., Kinel-Tahan, Y., Dubinsky, Z. & Yehoshua, Y. (2013). Natural antioxidants: function and sources. *Food Nutr. Sci.* 4, 643-649. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.46083>
- Shi, J., Zhao, B., Zhao, L., Zha, Y., Xiangqun, Y., Bin, Y. & Yue, E. (2024). Facilitating growth of maize (*Zea mays* L.) by biostimulants: a perspective from interaction between root transcriptome and rizhosphere microbiome. *J. Agric Food Chem.* 72 (7), 3415-3426. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09062>.
- Silva, D.S.O, Rocha, R. H. C., Da Nóbrega, J. S., Dias, G. A., De Lima, J. F. & Guedes, W. A. (2017). Post-harvest quality of lettuce cv. Elba in relation to *Spirulina platensis* foliar applications. *Cientifica* 45, 162-168. https://doi.org/10.15361/1984_5529.2017v45n2p162-168
- Soppelsa, S., Kelderer, M., Casera, C., Bassi, M., Robatscher, P. & Matteazzi, A. (2019). Foliar applications of biostimulants promote growth, yield and fruit quality of strawberry plants grown under nutrient limitation. *Agronomy* 9, 483. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090483>
- Stirk, W.A., Bálint, P., Tarkowská, D., Novák, O., Strnad, M., Ördög, V. & Van Staden, J. (2013). Hormone profiles in microalgae: Gibberellins and brassinosteroids. *Plant Physiol. Biochem.* 70, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.037>
- Tarraf, S.A., Talaat, I.M., El-Sayed, A.E.K.B. & Balbaa, L.K. (2015). Influence of foliar application of algae extract and amino acids mixture on fenugreek plants in sandy and clay soils. *Amino Acids* 16, 19-58. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n070106>
- Tejada-Ruiz, S., Gonzalez-Lopez, C., Rojas, E. & Jiménez-Becker, S. (2020). Effect of the foliar application of microalgae hydrolysate (*Arthrospira platensis*) and silicon on the growth of *Pelargonium hortorum* L.H. Bailey under salinity conditions. *Agronomy* 11, 1713. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111713>
- Tsavkelova, E.A., Klimova, S.Y., Cherdyntseva, T.A. & Netrusov, A.I. (2006). Hormones and hormone-like substances of microorganisms: A review. *Appl. Biochem. Microbiol.* 42, 229-235. <https://doi.org/10.1134/S000368380603001X>
- Tschiersch, H., Junker, A., Meyer, R. C. & Altmann, T. (2017). Establishment of integrated protocols for automated high throughput kinetic chlorophyll fluorescence analyses. *Plant Methods* 13, 54. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0204-4>
- Verma, A. (2016). Abiotic stress and crop improvement: Current Scenario. *Adv. Plants Agric. Res.* 4, 345-346. <https://doi.org/10.15406/apar.2016.04.00149>
- Wong, J.Y., Matanjun, P., Ooi, Y.B.H. & Chia, K.F. (2013). Characterization of phenolic compounds, carotenoids, vitamins and antioxidant activities of selected Malaysian wild edible plants. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 5, 621-631. <https://doi.org/10.3109/09637486.2013.763910>
- Woodward, A.W. & Bartel, B. (2005). Auxin: Regulation, action, and interaction. *Ann. Bot.*, 95, 707-735. <https://doi.org/10.1093/aob/mci083>

- Yang, L.Y., Zhou, S.Y.D., Lin, C.S., Huang, X.R.; Neilson, R. & Yang, X.R. (2022). Effects of biofertilizer on soil microbial diversity and antibiotic resistance genes. *Sci. Total. Environ.* 820, 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153170>
- Yanni, Y.G., Elashmouny, A.A. & Elsadany, A.Y. (2020). Differential response of cotton growth, yield and fiber quality to foliar application of *Spirulina platensis* and urea fertilizer. *Asian J. Adv. Agric. Res.* 12, 29-40. <https://doi.org/10.9734/ajaar/2020/v12i130072>
- Yakhin, O.I., Lubyanov, A.A., Yakhin, I.A. & Brown, P.H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Front. Plant Sci.* 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zhao, S., Zhang, Q., Liu, M., Zhou, H., Ma, C. & Wang, P. (2021). Regulation of plant responses to salt stress. *Int. J. Mol. Sci.* 22 (9), 4609. <https://doi.org/10.3390/ijms22094609>