

## MICROALGAS EN LA AGRICULTURA: UN IMPULSO AL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

### MICROALGAE IN AGRICULTURE: BOOSTING THE ACHIEVEMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Marco Antonio Piñón-Balderrama<sup>1a</sup>, Ofelia Adriana Hernández-Rodríguez<sup>1b\*</sup>, Andrés Francisco Martínez-Rosales<sup>2a</sup>, Héctor Alejandro Reza-Solis<sup>2b</sup>, Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios<sup>1c</sup> y Rafael Ángel Parra-Quezada<sup>1d</sup>

<sup>1a</sup> Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Ciudad Universitaria Campus 1 s/n, Chihuahua, Chihuahua, CP 31310, México  
<https://orcid.org/0009-0008-1126-2504>

<sup>1b</sup> Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Ciudad Universitaria Campus 1 s/n, Chihuahua, Chihuahua, CP 31310, México  
<https://orcid.org/0000-0003-1072-7521>

<sup>1c</sup> Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Ciudad Universitaria Campus 1 s/n, Chihuahua, Chihuahua, CP 31310, México  
<https://orcid.org/0000-0001-6559-4485>

<sup>1d</sup> Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Ciudad Universitaria Campus 1 s/n, Chihuahua, Chihuahua, CP 31310, México  
<https://orcid.org/0000-0002-9189-8332>

<sup>2a</sup> Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua, Periférico Francisco R. Almada Km. 1, Chihuahua, Chihuahua, CP 31415, México  
<https://orcid.org/0000-0001-9400-0105>

<sup>2b</sup> Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua, Periférico Francisco R. Almada Km. 1, Chihuahua, Chihuahua, CP 31415, México  
<https://orcid.org/0000-0001-8514-7893>

\* Autor para correspondencia: aernande@uach.mx

#### RESUM EN

La agricultura se enfrenta actualmente a algunos de los desafíos más grandes de su historia: satisfacer la creciente demanda de alimentos y, al mismo tiempo, alcanzar la sostenibilidad, en concordancia con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas, y que están estrechamente relacionados con el sector agrícola. Las investigaciones recientes se han centrado en buena medida hacia el uso de microorganismos como fuente de insumos para optimizar los sistemas productivos. Entre ellos, destacan las microalgas, por su notable potencial como herramientas innovadoras para abordar estos apremiantes retos. El objetivo de la presente revisión fue recopilar y sintetizar los conocimientos científicos relacionados con aplicaciones agrícolas de las microalgas que contribuyen positivamente en el logro de los ODS 02, 06 y 15. Este documento examina los beneficios documentados de la utilización de microalgas, según lo documentado en investigaciones recientes, haciendo hincapié en sus aplicaciones actuales y potenciales en cinco áreas clave de los sistemas de producción agrícola.

**Palabras clave:** Suelos, nutrición vegetal, bioestimulantes, manejo de estrés, biorremediación.

## ABSTRACT

**Agriculture is currently facing some of the greatest challenges in its history: meeting the growing demand for food while achieving sustainability, in alignment with several Sustainable Development Goals (SDGs) established by the United Nations and closely linked to the agricultural sector. Recent research has increasingly focused on the use of microorganisms as bio-inputs to optimize production systems. Among these, microalgae stand out due to their remarkable potential as innovative tools to address these pressing challenges. The objective of this review was to compile and synthesize scientific knowledge on the agricultural applications of microalgae that contribute positively to the achievement of SDGs 2, 6, and 15. This document examines the documented benefits of microalgae use, as reported in recent studies, emphasizing both current and potential applications across five key areas of agricultural production systems.**

**Keywords:** Soils, plant nutrition, biostimulants, stress management, bioremediation.

## INTRODUCCIÓN

La agricultura actual enfrenta los desafíos más grandes de su historia; por un lado, alimentar a una población en constante crecimiento, la cual se calcula que llegará a 8,6 mil millones de personas para el año 2030, con el agravante de que dicho crecimiento no seguirá el mismo comportamiento en todo el mundo sino que será mucho mayor en países con menores niveles de desarrollo, que además, enfrentan mayores dificultades para satisfacer las necesidades alimentarias de su población y donde también se registra la mayor cantidad de desperdicio de alimentos, llegando a representar hasta el 30% de la producción total (Burgos, 2018).

Por otro lado, la agricultura debe esforzarse por detener el deterioro medio ambiental del cual es en buena medida responsable. Los sistemas de producción agrícola intensiva están impulsando un mayor uso de agroquímicos, con un consumo mundial de aproximadamente 900 millones de L y una tasa de crecimiento anual cercana al 4% (Mamani y Filippone, 2018), una mayor fragmentación de tierras y una expansión de la deforestación de bosques primarios para crear nuevas áreas de cultivo o actividades ganaderas, siendo responsables de al menos, el 80% de la deforestación global que alcanzó la cifra de 130 millones de h entre los años 2000 y 2010 (Reyes-Palomino y Cano, 2022; Gómez-Lende, 2018), lo que ha llevado a la degradación del 33% de los suelos agrícolas a nivel mundial y con ello a la pérdida de hábitats agrícolas tradicionales, afectando la diversidad y la actividad de los microorganismos y provocando un aumento en las especies invasoras, la contaminación por nitrógeno reactivo y el cambio climático (FAO, 2016).

Adicionalmente, se tiene la problemática de la expansión de áreas de cultivo dedicadas a la producción de vegetales con fines no comestibles

como los biocombustibles, esta actividad es, incluso, impulsada por los mismos gobiernos para tratar de disminuir los impactos climáticos, esto agrava el conflicto entre la producción de alimentos y la producción de biocombustibles, porque no se puede ignorar que el crecimiento de la población urbana también demanda más tierras para el cultivo de alimentos (Wilson et al., 2020; Sartorello et al., 2020; Shah, 2013).

En el tema del agua los datos no son mejores, se calcula que por lo menos un 80% de este recurso, una vez utilizado por los seres humanos, se vierte al ambiente sin ningún tratamiento (Ortiz et al., 2024). Del total de agua extraída en el mundo, el 70% se destina para usos agrícolas y su mala gestión es la causa principal de los procesos de eutrofización de cuerpos de agua, que, en muchas ocasiones, se interpretan como el problema cuando en realidad representan la parte visible de un fenómeno más complejo (López-Padrón et al., 2020). El agua es el elemento esencial que vincula el medioambiente y la sociedad. Sin embargo, enfrenta importantes desafíos: 2,1 mil millones de personas carecen de servicios de agua potable gestionados de manera segura, y 4,5 mil millones de personas carecen de servicios de saneamiento adecuados y seguros (Miranda y Rosales, 2018).

Ante esta problemática, los países miembros de la ONU firmaron en el año 2015 los objetivos de ODS, entre los cuales se encuentran el 02, hambre cero, que busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible; el 06 que pretende dotar de agua limpia y saneamiento a toda la humanidad para el año 2030, y el objetivo 15, vida de ecosistemas terrestres, que pretende fomentar la biodiversidad a través del uso sustentable de los ecosistemas (Katila et al., 2019).

Tanto los problemas como los objetivos mencionados, han ocasionado una demanda de procesos innovadores en el sector agrícola, donde los microorganismos han cobrado

importancia como fuente de productos gracias a sus características de adaptabilidad (Graham y Ledezma, 2023).

Entre los microorganismos estudiados destacan las microalgas, organismos fotosintéticos de organización sencilla que pueden ser procariotas o eucariotas. Estas microalgas se caracterizan por su rápida reproducción y una plasticidad metabólica destacable. Además, se encuentran en prácticamente todos los ecosistemas terrestres y acuáticos (Coêlho et al., 2019). Debido a estas características, las microalgas han despertado un gran interés en los investigadores por su potencial uso biotecnológico, se puede mencionar el caso de la especie *Chlorella vulgaris* que ha sido objeto de más de 7.000 artículos científicos entre los años 2000 y 2020, la mitad de ellos en los últimos 4 años (López-Padrón et al., 2020; Gómez-Luna et al., 2022).

Las microalgas juegan un papel preponderante en la ecología, al realizar fotosíntesis son responsables de cerca del 50% del oxígeno de la atmósfera, incorporando carbono inorgánico del ambiente a los seres vivos, reduciendo los niveles de dióxido de carbono e iniciando las cadenas tróficas de la mayoría de los ambientes acuáticos (Cai et al., 2021).

Por todo lo anterior el objetivo de la presente revisión fue recopilar y organizar información en el tema de aplicaciones agrícolas de microalgas que impactan positivamente en la consecución de los ODS 02, 06 y 15. La información obtenida se agrupó en cinco subtemas e incluyó trabajos tanto a nivel laboratorio como de campo. En este documento se emplea el término microalga indistintamente para referirse tanto a organismos procariotas como son las cianobacterias, así como a organismos eucariotas en las que se incluyen las algas verdes y otras divisiones.

## MATERIALES Y METODOS

La obtención de la información se llevó a cabo mediante la exploración de artículos científicos en las bases de datos Science direct y Google académico, utilizando los operadores booleanos “and” y “or” combinados entre los comandos: Microalgae, soil y plants, y su traducción al español, empleando además los filtros de acceso libre, con fechas de 2018 y posteriores. Se encontraron en total 17.600 publicaciones, de las cuales se seleccionaron 98 trabajos para agruparlos en cinco subtemas principales que fueron:

1. Microalgas y su relación con el suelo
2. Microalgas en la nutrición vegetal
3. Microalgas y su potencial como

bioestimulantes

4. Microalgas y manejo de estrés en plantas
5. Microalgas en la biorremediación de aguas residuales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Microalgas y su relación con el suelo

El suelo es el recurso más importante en el abasto de alimentos para todos los seres vivos y las microalgas han tenido siempre una gran influencia en las condiciones edáficas desde el gran evento de oxidación, ocasionado por las cianobacterias, que duró 200 millones de años y que propició la formación de millones de nichos microbianos, los cuales transformaron de manera irreversible la mineralogía de la superficie del planeta y son considerados directa o indirectamente responsables de la mayoría de las especies minerales conocidas en la tierra (Poulton et al., 2021).

Actualmente las microalgas son parte de los consorcios biológicos que participan en el ciclo del nitrógeno, el fósforo, el azufre y la descomposición de residuos orgánicos (Rossi et al., 2018), así mismo, son responsables de la síntesis de estructuras mucilaginosas que sirven de hábitat a dichos consorcios y que además reducen la erosión y mejoran la disponibilidad de agua (Alvarez et al., 2021), por estos motivos las microalgas pueden ser utilizadas para mejorar las condiciones del suelo ayudando a eficientar los procesos de producción agrícolas. En la Tabla 1 se presentan algunos trabajos enfocados en la mejora de las propiedades del suelo a través de su inoculación con microalgas.

### 2. Microalgas en la nutrición vegetal

Las microalgas han sido estudiadas por sus efectos fertilizantes, se han reportado como fuentes de nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes, ya sea utilizando el organismo vivo o extrayendo su biomasa para aplicarla sola o en combinación con fertilizantes comerciales (Cortés-González, 2021; Zhongyi et al., 2024). Especies como *Acutodesmus dimorphus*, *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus dimorphus*, *Anabaena* sp. y *Nostoc* sp., son algunas de las que se han descrito con actividad fertilizante (Esraa et al., 2022).

El efecto de las microalgas en fertilización es variable en función de las especies de que se trate, se puede mencionar como ejemplo, la fijación biológica de nitrógeno de algunas cianobacterias (Wang et al., 2021), cuyo mecanismo puede ser aprovechado para disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados, los cuales implican un proceso de producción costoso en términos económicos

**Tabla 1. Microalgas utilizadas para mejorar las propiedades del suelo.****Table 1. Microalgae used to improve soil properties.**

Género/especie	Resultados	Fuente
<i>Scytonema (hyalinum, javanicum)</i>	Aumento en el contenido total de carbono orgánico de hasta 36% y hasta 251% de clorofila en el suelo, estimulación del desarrollo de biocostras compuestas por partículas de suelo, bacterias, hongos, líquenes y briófitos desde 1 mm en suelo arenoso hasta 9 mm en suelo arcilloso, las biocostras brindan importantes servicios ecosistémicos como retención de agua y estabilidad estructural del suelo.	Chamizo et al., 2018; Román et al., 2018.
<i>Chlorella (vulgaris, sorokiniana sp.)</i>	Estimulación del desarrollo de otros organismos fotoautótrofos como cianobacterias y la formación de biocostras con una cobertura de hasta 50% del suelo, 92,5% de remoción de cadmio y hasta 67% más actividad biológica en el suelo medida por las enzimas ureasa, deshidrogenasa y fosfomonoesterasa.	Barone et al., 2018; Shen et al., 2018; Rad et al., 2022.
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Incremento en las poblaciones de hongos y bacterias considerados promotores de crecimiento vegetal como <i>Trichoderma, Bacillus y pseudomonas sp.</i>	Junping et al., 2020; Barone et al., 2018.
<i>Nostoc sp.</i>	Incrementos significativos en el contenido de carbono orgánico, nitrógeno y en la clorofila en el suelo, sí como en la actividad enzimática.	Shisy et al., 2024; Román et al., 2018.
<i>Anabaena (circinalis y tortulosa) y en conjunto con Trichoderma o Azotobacter sp.</i>	Incremento de las poblaciones de microorganismos promotores de crecimiento como <i>Bacillus, Pseudomonas y Trichoderma</i> , entre otros. Así mismo, incrementan hasta 50% el carbono orgánico y el contenido general de micro y macronutrientes.	Junping et al., 2020; Kanchan et al., 2019.
<i>Coelastrella sp. con Aspergillus o Penicillium sp.</i>	Aumento de carbono orgánico en un 55,41%, capacidad de intercambio catiónico en 27,18%, humedad del suelo en 6,29%, actividad de la sacarasa en 471% y carbono de la biomasa microbiana en un 216%.	Wu et al., 2022.

y ambientales, además del hecho de que el uso de estos fertilizantes representa pérdida de al menos un 30% de los productos aplicados ya sea por lixiviación en forma de nitratos o por volatilización en forma de amoníaco o de nitrógeno molecular (López-Padrón et al., 2020).

Por otra parte, gracias a los altos niveles de macro y micronutrientes contenidos en las microalgas, las mismas han sido estudiadas como auxiliares en los programas de fertilización integral en diversos cultivos, sin embargo y a pesar de ser bien conocida la producción de biofertilizantes por las microalgas, hasta la fecha es difícil probar sus efectos a gran escala y a través del tiempo, en este sentido muchos autores han propuesto su producción a partir de efluentes residuales de otras actividades para reducir los

costos (Carneiro et al., 2021; Ferreira et al., 2021; Navarro-López et al., 2020; Sánchez-Quintero et al., 2023).

Una opción más del empleo de microalgas en fertilización está en su capacidad para aportar fósforo a las plantas, debido a que absorben del medio hasta 2,2 t ha<sup>-1</sup> de este elemento (Fernández et al., 2018), utilizando microalgas se puede provocar la formación de estruvita, el cual es una mezcla de fosfatos con magnesio y amonio que es utilizado como fertilizante de liberación lenta (Goldsberry et al., 2023), lo que resulta muy importante ya que la manera en que se suministra fósforo a los cultivos actualmente es un ejemplo de insostenibilidad porque la roca fosfórica se agota rápidamente y está pronosticado como un problema serio en el futuro cercano (Zareen,

2020). Algunos ejemplos del uso de microalgas utilizadas en el tema de la nutrición vegetal se presentan en la Tabla 2.

### 3. Microalgas y su potencial como bioestimulantes

Cuando se aplican bioestimulantes a las

plantas o a sus medios de cultivo se promueven el desarrollo vegetativo, el rendimiento, la calidad de los cultivos y la floración temprana, este último aspecto puede ser deseable en ciertas regiones geográficas (Mukami et al., 2023). El interés por el uso de las microalgas como bioestimulantes se debe a su capacidad de producir fitohormonas,

**Tabla 2. Microalgas utilizadas en el aporte de nutrientes a los cultivos.**

**Table 2. Microalgae used in the supply of nutrients to crops.**

Género/especie	Resultados	Fuente
<i>Anabaena (azotica, variabilis, tortulosa, cilíndrica)</i>	50% menos fertilización nitrogenada y 37% menos lixiviación, 22% más rendimiento en <i>Oriza sativa</i> (arroz), 25% menos fertilizante nitrogenado y 180% más nitrógeno disponible en <i>Chrysanthemum</i> (crisantemo), 40% más producción de biomasa y 10% más contenido de nitrógeno en <i>Triticum aestivum</i> (trigo).	Song et al., 2021; Bao et al., 2021; Bharti et al., 2021; Kholssi et al., 2022.
<i>Scenedesmus (obliquous sp., quadricauda)</i>	50% menos fertilización nitrogenada en <i>Lactuca sativa</i> (lechuga), <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) y <i>Osmium basilicum</i> (albahaca).	Cortés-González., 2021; López, 2022; Puglisi et al., 2020.
<i>Chlorella (vulgaris, minutissima)</i>	21% más rendimiento que con fertilización química en <i>Triticum aestivum</i> (trigo), mayor peso en plantas de <i>Lactuca sativa</i> (lechuga). Rendimiento 74% mayor que el control y sin diferencia respecto al 100% de fertilización química en <i>Spinacia oleracea</i> (espinaca).	Qingnan et al., 2021; Puglisi et al., 2020; Sharma et al., 2021.
<i>Spirulina platensis</i>	Se alcanzaron los mismos rendimientos que con 100 kg ha <sup>-1</sup> de nitrógeno sintético en <i>Zea mayz</i> (maíz).	El-Moursy et al., 2019.
<i>Fischerella TB22</i>	Disminución de 50% en fertilización NPK en plantas de <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate).	Martínez, 2021.
<i>Trichormus variabilis</i>	Rendimientos superiores entre 15,7 y 29,6%, comparados con fertilización química en <i>Crataegus pinnatifida</i> (espino chino).	Ma et al., 2024.
<i>Arthrospira platensis</i> más <i>Chlorella vulgaris</i> más estiércol de bovino	Incrementos de 15% en altura de planta, de 30 a 50% en número de hojas, 86% de peso fresco y 48% de peso seco en <i>Zea mayz</i> (maíz).	Dineshkumar et al., 2019.
<i>Nostoc (SAB-M612), Nostoc sp. con levadura</i> <i>Sacharomyces cereviseae.</i>	50% más longitud de tallos, 30% más producción de hojas y 50% más peso fresco en plantas de <i>Cucumis sativus</i> (pepino), atribuidos a la solubilización de fosfatos y fierro. Entre 25 y 50% menos fertilización nitrogenada para alcanzar los mismos resultados que con 100% de nitrógeno sintético, reducción de hasta 25% de la fertilización en <i>Triticum aestivum</i> (trigo), debido a la mejora en la absorción de nitrógeno, fósforo y potasio.	Toribio et al., 2020; Hamed et al., 2022.
<i>Nostoc sp., Calothrix sp. Desmodesmus armatus.</i>	Fertilización al 50% con el tratamiento de microalgas igualó el rendimiento versus 100% de fertilización química en un cultivo de <i>Capsicum annuum</i> (chile).	Shisy et al., 2024.

compuestos fenólicos, polisacáridos, aminoácidos y otras moléculas estructuralmente muy parecidas a las que producen las plantas, pero a una velocidad mucho mayor que las mismas. En producción de fitohormonas se ha encontrado la producción de ácidos indolacético, giberélico, abcísico y citocininas como Isopentenyl adenina y trans-zeatina. Entre los compuestos fenólicos se encuentran la catequina, la quer cetina y el kaempferol y otras moléculas con la misma estructura que las encontradas en plantas (Sánchez-Quintero et al., 2023; Gonçalves, 2021; Alvarez et al., 2021; Plaza et al., 2018; Benayad et al., 2014; Bystrom et al., 2008).

Los efectos estimulantes en plantas a partir de microalgas son estudiados desde etapas de germinación (Mutum et al., 2023) hasta etapas de cosecha midiendo parámetros como la formación de raíces, tallos, hojas, flores y frutos (Toribio et al., 2020). La Tabla 3 muestra algunos estudios donde se ha probado la eficacia de las microalgas en la estimulación de plantas.

#### **4. Microalgas y manejo de estrés en plantas**

En condiciones de campo las plantas enfrentan numerosos factores de estrés abióticos como la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas, así como factores de estrés bióticos, incluidas las plagas y los patógenos que afectan la salud y por lo tanto el rendimiento de los cultivos. Las microalgas son organismos que pueden emplearse para ayudar a las plantas a aumentar la tolerancia a dichos factores estresantes (Kusvuran, 2021; Kumar et al., 2022).

#### ***Microalgas en el manejo del estrés abiótico***

En el tema del estrés abiótico, para disminuir el impacto del cambio climático es crucial mejorar la tolerancia de los cultivos (Baillo et al., 2019). Algunas microalgas estimulan el aumento de los contenidos de magnesio y de potasio en la planta, los cuales están implicados en la apertura y cierre de estomas, otras especies son capaces de producir una variedad de enzimas con capacidad antioxidante como la catalasa, la superóxido dismutasa y ascorbato peroxidasa además de algunos aminoácidos libres y carbohidratos solubles que aumentan la capacidad de las plantas para enfrentar condiciones de sequía, también se han reportado aumentos en los contenidos de prolina y compuestos fenólicos y antioxidantes en casos de estrés por salinidad (Kusvuran, 2021; Elarroussi et al., 2018; Pérez-Madruga et al., 2020). En este sentido, la investigación con microalgas presenta más avances en los temas de estrés por sequía y salinidad, no así en manejo de temperaturas extremas, aun cuando es bien conocida su capacidad para sintetizar

compuestos capaces de modificar la composición lipídica de la membrana celular, lo que puede ayudar a las plantas en la adaptación a diferentes temperaturas (Bustamante, 2018). La Tabla 4 muestra algunos estudios donde las microalgas han sido usadas para disminuir el estrés abiótico en plantas.

#### ***Microalgas en el manejo del estrés biótico***

El uso indiscriminado de pesticidas sintéticos entre los que se cuentan los organoclorados, organofosforados, carbamatos, glifosato y otros ha ocasionado serios problemas ambientales y representa un riesgo considerable para la salud humana (Díaz y Aguilar, 2018). Además, ha contribuido al desarrollo de plagas resistentes, lo que reduce progresivamente la eficacia de estos insumos. Se estima que aproximadamente el 98% de los insecticidas y el 95% de los herbicidas aplicados no alcanzan al organismo objetivo y son dispersados por el viento o el agua (Campos, 2018). Estos compuestos tóxicos pueden transportarse a largas distancias como residuos volátiles que se liberan a la atmósfera y regresan en forma de precipitación, afectando ecosistemas lejanos. Además, pueden infiltrarse en el suelo y ser arrastrados por escorrentía, lixiviación o lavado, contaminando cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos, mares y acuíferos subterráneos (López-Padrón et al., 2020).

A esto se suma el uso excesivo de dosis, el cual se calcula entre dos y tres veces mayores que las recomendadas, la mezcla inadecuada de productos para aumentar su efectividad y la aplicación de sustancias no específicas para las plagas o enfermedades presentes. Estas prácticas, lejos de ser excepcionales, son comúnmente observadas en el manejo agrícola convencional y representan un grave problema para la sostenibilidad del agroecosistema (Campos, 2018). Al respecto, las microalgas ofrecen una alternativa prometedora para sustituir a los plaguicidas artificiales, ya que son más seguras y respetuosas con el medio ambiente (Brito-Bello y Lopez, 2023). Su producción de sustancias con efectos alelopáticos como flavonoides que incluyen dimetoxiflavona, ramnonythexosil-metil-quercetina y catequina, terpenoides y compuestos fenólicos como ácidos protocatecuico, cafeico y cafeoilglucósido, compuestos iguales a los que producen algunas plantas como defensa a situaciones de estrés biótico (Haoujar et al., 2019), estos compuestos perfilan a estos microrganismos como potenciales fungicidas, herbicidas e insecticidas ecológicos en sustitución de los convencionales (Doaa et al., 2022).

Cabe señalar que la cantidad de estudios sobre microalgas usadas como insecticidas o herbicidas

**Tabla 3. Microalgas utilizadas como bioestimulantes.****Table 3. Microalgae used as biostimulants.**

Género/especie	Resultados	Fuente
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella sp.</i> <i>Chlorella</i> sp. cepa MACC-360.	Aumentos en el índice de germinación de 170% en <i>Cucumis sativus</i> (pepino), 130% en <i>Triticum aestivum</i> (trigo), 120% en <i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol), 100% en <i>Glycine max</i> (soya), 120% en <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) y 147% en <i>Triticum aestivum</i> (trigo). Producción de 216,38 ng g <sup>-1</sup> de ácido indolacético, 1.200 ng g <sup>-1</sup> de citocininas, expresión de genes responsables de sintetizar ácido jasmónico, etileno y ácido abscísico.	Ferreira et al., 2021; Viegas et al., 2021; Mukami et al., 2023; Rupawalla et al., 2022.
<i>Scenedesmus obliquus</i> .	160% más germinación en <i>Cucumis sativus</i> (pepino), 125% en <i>Triticum aestivum</i> (trigo), 120% en <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) y 40% en <i>Lepidium sativum</i> (berro de jardín), que sugiere la presencia de giberelinas. 60% más formación de raíces en <i>Vigna radiata</i> (soja verde) y <i>Cucumis sativus</i> (pepino), y 87,5% más expansión en cotiledones en <i>Cucumis sativus</i> (pepino) atribuidas a la presencia de auxinas y citocininas. Hasta 25% más hojas y 15% mayor peso total de planta inoculando la solución nutritiva para <i>Lactuca sativa</i> (lechuga).	Navarro-López et al., 2020; Ferreira et al., 2021; Álvarez-Gonzalez et al., 2023.
<i>Scenedesmus sp.</i>	Incremento del peso seco de la raíz y peso seco y fresco de la flor en 49, 20 y 22%, respectivamente, en plantas de <i>Petunia</i> × híbrida. Producción de hasta 865 ng g <sup>-1</sup> de citocininas, 100 ng g <sup>-1</sup> de giberelinas y 38 ng g <sup>-1</sup> de ácido indolacético.	Plaza et al., 2018; Rupawalla et al., 2022.
<i>Tetradesmus dimorphus</i>	18% más peso fresco, 24% más peso seco y 27% más altura de planta en <i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol), debidos a la producción de 5.8 µg L <sup>-1</sup> de ácido indolacético y 2 µg L <sup>-1</sup> de citocininas.	Refaay et al., 2021.
<i>Arthrospira platensis</i>	24, 33 y 25% más peso fresco, peso seco y longitud de planta, respectivamente, en plantas de <i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol), con una producción de 12 µg L <sup>-1</sup> de giberelinas y 1.8 µg L <sup>-1</sup> de ácido indolacético. 35, 19 y 21%, respectivamente, del peso seco de la raíz, peso seco y peso fresco de la flor de <i>Petunia</i> , registrando mayor concentración de citoquininas, giberelinas, auxinas, ácido salicílico y ácido abscísico.	Refaay et al., 2021; Plaza et al., 2018.
Consorcio de <i>Chlorella sp.</i> , <i>Scenedesmus sp.</i> y <i>Spirulina sp.</i>	Aceleración de la germinación de tomate en 3 días comparado con las semillas sin tratar.	Supraja et al., 2020.
<i>Cylindrospermum michailovskoense</i> , <i>Anabaena vaginicola</i> .	Incremento de 40% en contenido de fenoles y 53% de flavonoides, compuestos de interés en plantas de <i>Plantago major</i> (llantén), una planta con aplicaciones medicinales.	Chookalaii et al., 2020.

**Tabla 4. Potencial de las microalgas en el manejo del estrés abiótico.**  
**Table 4. Potential of microalgae in the management of abiotic stress.**

Género/especie	Resultados	Fuente
<i>Arthrosphaera platensis</i> y vermicomposta.	Hasta 51% más K <sup>+</sup> en la planta con estrés por sequía en plantas de <i>Gossypium barbadense</i> L. (algodón).	Alharbi et al., 2023.
<i>Chlorella sorokiniana</i> , <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> .	Aumento de hasta 60% del contenido de Mg <sup>2+</sup> y 300% más de K <sup>+</sup> en tallos y raíces de plantas de <i>Zea mays</i> (maíz) estresadas por sequía. Disminución de especies reactivas de oxígeno.	Martini et al., 2021.
<i>Chlorella vulgaris</i> .	Disminución de estrés oxidativo por aumento en la actividad enzimática, aumento en pigmentos y carotenoides en plantas de <i>Brassica oleracea</i> (brócoli) en condiciones de sequía.	Sebnem, 2021.
<i>Roholtiella sp.</i>	Aumento de hasta 40% en los niveles de prolina, 40% más de la enzima catalasa y la capacidad antioxidante en plantas de <i>Capsicum annum</i> (chile) con estrés salino.	Bello et al., 2022.
<i>Dunaliella salina</i> , <i>Chlorella ellipsoidea</i> , <i>Aphanothecce sp.</i> , <i>Arthrosphaera máxima</i> .	Disminución del estrés salino a través del aumento de hasta 22% en los sistemas de brotes y raíces en plantas con estrés por salinidad en <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate). Aumento de 140% en el contenido de prolina, mayor contenido de clorofila a en plantas estresadas y mejora de la actividad enzimática.	Mutale et al., 2021.
<i>Dunaliella salina</i> .	Mayor longitud, peso seco de brotes y raíces de plantas de <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) bajo estrés salino, por un aumento de 31% en prolina, 42% de compuestos fenólicos y enzimas antioxidantes.	Elarroussi et al., 2018.

no es tan abundante como en el caso de su aplicación como fungicidas. La Tabla 5 muestra ejemplos donde se han utilizado microalgas para ayudar a las plantas en el manejo de estrés biótico.

##### 5. Microalgas en la biorremediación de aguas residuales

El manejo inadecuado de aguas residuales genera la contaminación de cuerpos de agua y es un problema complejo que involucra a diversos sectores de la sociedad. La lixiviación de nitratos y fosfatos constituye un riesgo ambiental que la actividad agrícola debe afrontar y mitigar. Este problema no solo representa una pérdida económica por la disminución en la eficiencia de los fertilizantes aplicados, sino también un problema ambiental significativo. La pérdida de nutrientes puede provocar la acumulación de nitratos en el subsuelo, los cuales, al ser lixiviados, pueden alcanzar los acuíferos o ser arrastrados hacia cuerpos de agua superficiales

como ríos, lagos y embalses causando impactos negativos en los ecosistemas acuáticos (Martelli et al., 2024; López-Padrón et al., 2020).

Una de las opciones para atender esta problemática es el uso de microalgas para la biorremediación gracias a su capacidad de absorción de fosfatos o nitratos de diferentes efluentes, o bien a través de la captura de metales pesados del agua como plomo, cadmio, cromo, mercurio y níquel (Qian y Yuao, 2022) e, incluso, la obtención de biocombustibles a partir de aguas de deshecho de otros procesos (Fal et al., 2023).

La biorremediación con microalgas ha demostrado generar hasta 1 kg de biomasa por metro cúbico de agua, lo cual es cinco veces mayor que lo obtenido con métodos físicos y químicos convencionales (Martelli et al., 2024). En la Tabla 6 se muestran algunas investigaciones donde se utilizan microalgas en la remediación de aguas de diferentes efluentes.

**Tabla 5. Las microalgas y su aplicación en el manejo de estrés biótico.**  
**Table 5. Application of microalgae in the management of biotic stress.**

Género/especie	Organismos objetivo	Resultados	Fuente
<b>Hongos fitopatógenos</b>			
<i>Phaeodactylum tricornutum, Scenedesmus obliquus</i>	<i>Sclerotium rolfsii, Botrytis cinerea.</i>	<i>P. trichornutum</i> inhibió a <i>Botritis cinerea</i> un 11,47%, <i>Scenedesmus obliquus</i> inhibió a <i>Sclerotium rolfsii</i> un 32%.	Schmid et al., 2022.
<i>Spirulina platensis.</i>	<i>Zymoseptoria tritici.</i>	Hasta 70% inhibición del hongo.	Le mire et al., 2019.
<i>Chlorella vulgaris.</i>	<i>Fusarium oxysporum, Fusarium sp. Fusarium solani, Alternaria flavus y Alternaria niger.</i>	Inhibición de crecimiento de <i>Fusarium oxysporum</i> en 73%, <i>Fusarium</i> sp. 63%, <i>Fusarium solani</i> 60%, <i>Alternaria flavus</i> 56% y <i>Alternaria niger</i> 50%.	Kahkashan et al., 2022.
<i>Anabaena</i> sp., <i>Ecklonia</i> sp., <i>Jania</i> sp.	<i>Botrytis cinerea.</i>	9,8% de inhibición de crecimiento del fitopatógeno.	Righini et al., 2019.
<i>Anabaena</i> sp., <i>Ecklonia</i> sp., <i>Jania</i> sp.	<i>Rhizoctonia solani.</i>	Reducción del 50% en el índice de enfermedad.	Righini et al., 2021.
<b>Insectos plaga</b>			
<i>Scenedesmus obliquus, Amphora coffeaeformis.</i>	<i>Culex pipiens.</i>	Se alcanzó la dosis letal media con entre 513 y 855 µg L <sup>-1</sup> comparado con 173.16 µg L <sup>-1</sup> de un insecticida comercial a base de piretroides.	Hassan et al., 2021.
<i>Sargassum vulgar</i> y <i>Spirulina platensis.</i>	<i>Spodoptera littoralis.</i>	Malformación de pupas y de adultos hasta 59 y 33% respectivamente con extractos al 7% de concentración.	Rania et al., 2020.
<i>Chara vulgaris, Parachlorella kessleri, Ulva intestinalis, Cladophora glomerata, Nostoc carneum.</i>	<i>Spodoptera littoralis.</i>	Actividad insecticida de hasta 100% de mortalidad con 100 mg L <sup>-1</sup> , efecto atribuido al contenido de ácidos grasos como linoleico, palmitico, oleico, α-linolenico, y 7, 10-hexadecadienoico especialmente en <i>N. carneum</i> y <i>P. kessleri</i> .	Saber et al., 2018.
<i>Galaxaura elongata, Jania rubens, Codium tomentosum.</i>	Larvas de <i>Culex pipiens L.</i>	Se alcanzó la dosis letal media a una concentración de 31 mg kg <sup>-1</sup> .	Doaa et al., 2022.
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> combinado con óxido de zinc (ZnO).	<i>Tenebrio molitor.</i>	5 mL de ZnO más 45 mL de cultivo de microalgas, aumentó la mortalidad de las larvas de 33 a 66% en comparación con el ZnO solo.	Rankic et al., 2021.
<b>Plantas arvenses</b>			
<i>Chlamydomonas reinhardtii cepa CC124.</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i> (oruga), <i>Amaranthus palmeri</i> (bledo).	Mismo nivel de inhibición que utilizando un herbicida no selectivo a base de glufosinato.	Brito-Bello y López (2023).

<i>Synechocystis aquatilis</i> y su producción de norharmane.	<i>Avena fatua L.</i> , (avena cimarrona) <i>Plantago lanceolata L.</i> (llantén menor), <i>Echinochloa crus-galli</i> (pasto dentado).	Inhibición del 57% de la germinación de <i>A. fatua</i> y 27% en <i>P. lanceolata</i> . El crecimiento de <i>P. lanceolata</i> , y <i>E. crus-galli</i> se vio reducido en un 75 y 85%, respectivamente.	López-González et al., 2020.
<i>Chlorella spp.</i> más <i>Trichoderma coningiopsis</i> .	<i>Conyza bonariensis</i> (rama negra).	100% de inhibición a los 15 días de la aplicación.	Stefanski et al., 2020.

**Tabla 6. Uso de microalgas en la remediación de agua residual.****Table 6. Use of microalgae in wastewater remediation.**

Género/especie	Resultados	Fuente
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Microcystis sp.</i>	Utilizando agua residual agrícola con 41 mg kg <sup>-1</sup> de fosfatos se logró la recuperación del 91,5%.	Qingnan et al., 2021.
<i>Chlorella vulgaris</i> .	A partir del agua residual doméstica con 44,3 mg L <sup>-1</sup> de nitratos se alcanzó la recuperación del 100% y con 5 mg L <sup>-1</sup> de fosfatos se recuperó el 66,8%.	Acevedo et al., 2024.
<i>Cylindrotheca closterium</i> , <i>Rhodomonas salina</i> , <i>Chaetoceros gracilis</i> , <i>Tetraselmis suecica</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Navicula sp.</i>	Recuperación del 100% de nitrógeno y desde 58% hasta 91% de fosfatos utilizando agua residual acuícola a una concentración inicial de 8.6 mg L <sup>-1</sup> y 10.55 mg L <sup>-1</sup> , respectivamente.	Martelli et al., 2024.
<i>Parachlorella kessreli</i> , <i>Desmodesmus armatus</i> .	Remoción del 50% de nitrógeno total usando agua residual agrícola con 800 mg L <sup>-1</sup> y 70% de fósforo total usando agua con 60 mg L <sup>-1</sup> .	Sandoval et al., 2021
<i>Scenedesmus sp.</i>	Obtención de biomasa de microalgas con 6,69% de nitrógeno, relación NPK de 1,0, 0,25 y 0,05, respectivamente, y 6% de Ca <sup>+2</sup> con aguas residuales municipales.	Álvarez-González et al., 2023.
Consorcio de microalgas no especificado.	Usando aguas residuales municipales se consiguió la reducción de carga bacteriana del filo firmicutes de 33 a 10%, aumento de 43% del filo proteobacteria.	Cunha et al., 2024.

## CONCLUSIONES

La información presentada en este documento destaca el gran potencial biotecnológico de las microalgas como una herramienta prometedora en la transición hacia una agricultura más sostenible, resiliente y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En el suelo, su aplicación contribuye a mejorar la estructura, actividad microbiana y disponibilidad de nutrientes, lo que promueve

la vida terrestre y contribuye a sistemas agrícolas más productivos y saludables, en concordancia con los ODS 02 y 15.

En la nutrición vegetal, las microalgas ofrecen una fuente renovable de compuestos bioactivos y nutrientes esenciales que fortalecen el crecimiento vegetal y permiten una reducción en el uso de insumos químicos, lo cual aporta a la meta del ODS 2 de lograr la seguridad alimentaria y los sistemas sostenibles.

Asimismo, el uso de microalgas como

bioestimulantes y agentes en el manejo de estrés biótico y abiótico contribuye al aumento de la tolerancia de las plantas frente a condiciones adversas como salinidad, sequía, ataque de plagas y organismos fitopatógenos, lo que puede ser clave para alcanzar los dos ODS mencionados.

Por otra parte, su papel en la biorremediación de aguas residuales se traduce en una solución viable para el tratamiento de efluentes agrícolas e industriales, mejorando la calidad del agua y promoviendo la reutilización del recurso, en línea con los principios del ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (México), por la beca otorgada a uno de los autores como estudiante de maestría.

## Contribución de los autores

Todos los autores participaron activamente en la revisión bibliográfica, en la elaboración de la metodología, en la discusión de los resultados y en la revisión y aprobación de la versión final del artículo.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo, S. L., M. Fajardo y H. Melo. 2024. Bioensayos de bioabsorción de nitratos y fosfatos con aguas residuales domésticas del parque ambiental cantarrana–bogotá, dc, utilizando *Chlorella vulgaris*. RFCB 4(1):10-10.
- Alharbi, K., E. M. Hafez, A. Omara and H. Osman. 2023. Mitigating osmotic stress and enhancing developmental productivity processes in cotton through integrative use of vermicompost and cyanobacteria. Plants 12(9):1872. doi.org/10.3390/plants12091872.
- Alvarez, A., S. Weyers, H. Goemann, B. Peyton, and R. Gardner. 2021. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. Algal Res. 54:1-24. doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200.
- Álvarez-González, A., E. Uggetti, L. Serrano, G. Gorchs, M. Escolà, V. Matamoros, E. González-Flo, and R. Díez-Montero. 2023. Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers? Environmental Pollution 324:116-224. doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121399.
- Baillo, E., R. Kimotho, Z. Zhang, and P. Xu. 2019. Transcription factors associated with abiotic and biotic stress tolerance and their potential for crops improvement. Genes 10(10): 771. doi:10.3390/genes10100771.
- Bao, J., C. Zhuo, D. Zhang, Y. Li, F. Hu, H. Li, and H. He. 2021. Potential applicability of a cyanobacterium as a biofertilizer and biopesticide in rice fields. Plant and Soil 463(1-2):97-112. doi:10.1007/s11104-021-04899-9.
- Barone, V., I. Puglisi, F. Fragalà, P. Stevanato, and A. Baglieri. 2018. Effect of living cells of microalgae or their extracts on soil enzyme activities. Archives of Agronomy and Soil Science 65(5):712-726. doi.org/10.1080/03650340.2018.1521513.
- Bharti, A., R. Prasanna, G. Kumar, L. Nain, A. Rana, B. Ramakrishnan, and Y. S. Shivay. 2021. Cyanobacterial amendment boosts plant growth and flower quality in *Chrysanthemum* through improved nutrient availability. Applied Soil Ecology 162:101-315. doi:10.1016/j.apsoil.2021.103899.
- Bello, A., R. Ben-Hamadou, H. Hamdi, I. Saadaoui, and T. Ahmed. 2022. Application of Cyanobacteria (*Roholtiella* sp.) liquid extract for the alleviation of salt stress in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants grown in a soilless system. Plants 11:1-104. doi:10.3390/plants11010104.
- Benayah, Z., C. Gómez, and N. Es-Safi. 2014. Characterization of flavonoid glycosides from fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) crude seeds by HPLC-DAD-ESI/MS analysis. Int. J. Mol. Sci. 15: 20668-20685.
- Brito-Bello, A., y D. Lopez. 2023. Bioactive compounds with pesticide activities derived from aged cultures of green Microalgae. Biology 12(8):1149. doi.org/10.3390/biology12081149.
- Burgos, M. 2018. Los desafíos del futuro: crecimiento poblacional y desarrollo. Journal de Ciencias Sociales 6(11): 13.
- Bustamante, A. 2018. Caracterización de mecanismos implicados en la regulación de la respuesta a estrés por frío en plantas. Tesis. Programa de doctorado en biotecnología. Universidad politécnica de Valencia. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10261/184705>.
- Bystrom, L., B. Lewis, D. Brown, E. Rodriguez, and R. Obendorf. 2008. Characterisation of phenolics by LC-UV/Vis, LC-MS/MS and sugars by GC in *Melicoccus bijugatus* Jacq. 'Montgomery' fruits. Food Chem. 111: 1017-1024.
- Cai, J., A. Lovatelli, J. Aguilar, L. Cornish, L. Dabbade, A. Desrochers, and X. Yuan. 2021. Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. FAO Fisheries and Aquaculture Circular 1229:1-48. doi:10.4060/cb5670en.

- Campos, M. 2018. El uso de pesticidas en la agricultura y su desorden ambiental. Revista Enfermería la Vanguardia 6(2): 40-47.
- Carneiro, M., K. Ranglová, L. Lakatos., J. Manoel, T. Grivalský, D. Kozhan and J. Masojídek. 2021. Growth and bioactivity of two chlorophyte (*Chlorella* and *Scenedesmus*) strains co-cultured outdoors in two different thin-layer units using municipal wastewater as a nutrient source. Algal Res. 56: 102299.
- Chamizo, S., G. Mugnai, F. Rossi, G. Certini, and R. De Philippis. 2018. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. Frontiers in Environmental Science 6:1-14. doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049.
- Chookalaii, H., H. Riahi, Z. Shariyatmadari, Z. Mazarei, and M. Hashtroudi. 2020. Enhancement of total flavonoid and phenolic contents in *Plantago major* L. with plant growth promoting cyanobacteria. Journal of Agricultural Science and Technology 22(2):505-518.
- Coêlho D., L. Tundisi, K. Cerqueira, J. Rodrigues, P. Mazzola, E. Tambourgi, and R. Souza. 2019. Microalgae: Cultivation aspects and bioactive compounds. Brazilian Archives of Biology and Technology 62: e19180343. Doi: 10.1590/1678-4324-2019180343.
- Cortés-González, I. 2021. Biofertilizante del consorcio cianobacterias (*Trichormus* sp.) y microalgas (*Scenedesmus* sp.) en formulación liofilizada o biomasa húmeda, como sustituto parcial o total a la fertilización con nitrógeno en plántulas de tomate. Tesis. Licenciatura en ingeniería agronómica. Universidad Nacional Costa Rica. URL <http://hdl.handle.net/11056/27981>.
- Cunha-Chiamolera T., M. Urrestarazu, A. Morillas-España, R. Ortega, I. Miralles, C. González-López, and I. Carbajal-Valenzuela. 2024. Evaluation of the reuse of regenerated water from microalgae-related wastewater treatment processes in horticulture. Agricultural Water Management 292:108-660. doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108660.
- Díaz, O. and C. Aguilar. 2018. Los pesticidas; clasificación, necesidad de un manejo integrado y alternativas para reducir su consumo indebido: una revisión. Revista Científica Agroecosistemas 6(2): 14-30.
- Dineshkumar, R., J. Subramanian, J. Gopalsamy, P. Jayasingam, A. Arumugam, S. Kannadasan, and P. Sampathkumar. 2019. The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.). Waste and Biomass Valorization 10:1101-1110. doi:10.1007/s12649-017-0123-7.
- Doaa, R., H. Neamat, A. Lamya, S. Sayed, A. Saad, M. El-Saadony, and M. Shaimaa. 2022. Screening and evaluation of different algal extracts and prospects for controlling the disease vector mosquito *Culex pipiens* L. Saudi Journal of Biological Sciences 29(2):933-940. doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.009.
- Elarroussi, H., R. Benhima, A. Elbaouchi, B. Sijilmassi, N. El Mernissi, A. Aafsar, and A. Smouni. 2018. *Dunaliella salina* exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). Journal of Applied Phycology 30:2929-2941. doi:10.1007/s10811-017-1382-1.
- El-Moursy, R., W. Abido, and M. Badawi. 2019. Response of maize productivity to nitrogen fertilizer and spraying with blue green algae extract. International Journal of Agronomy and Agricultural Research 14(2):10-20.
- Esraa, E., A. Ahmed, E. Ahmed, A. Elesawy, S. Moustafa, A. Mouhamed, A. Nouran, and A. El-Shershaby. 2022. Algae as Bio-fertilizers: Between current situation and future prospective. Saudi Journal of Biological Sciences 29(5):3083-3096. doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.03.020.
- Fal, S., A. Smouni, and ElArroussi. 2023. Integrated microalgae-based biorefinery for wastewater treatment, industrial CO<sub>2</sub> sequestration and microalgal biomass valorization: A circular bioeconomy approach. Environmental Advances 12:100-365. doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100365.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2016. Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. [http://www.fao.org/3/a\\_i5126s.pdf](http://www.fao.org/3/a_i5126s.pdf)
- Fernández, F., J. Sevilla, y E. Grima. 2018. Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. Mediterráneo Económico 31:309-331.
- Ferreira, A., L. Melkonyan, S. Carapinha, B. Ribeiro, D. Figueiredo, G. Avetisova, and L. Gouveia. 2021. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. Environmental Advances 4:100062-100062. doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100062.
- Goldsberry, P., P. Jeppesen, J. McLean, and R. Sims. 2023. An attached microalgae platform for recycling phosphorus through biologically mediated fertilizer formation and biomass cultivation. Cleaner Engineering and Technology 17:100701. doi.org/10.1016/j.clet.2023.100701.
- Gómez-Lende, S. 2018. Destrucción de bosques nativos y deforestación ilegal: el caso argentino (1998-2016). Papeles de Geografía (64).

- Gómez-Luna, L., L. Tormos-Cedeno, y Y. Ortega-Díaz. 2022. Cultivo y aplicaciones de *Chlorella vulgaris*: principales tendencias y potencialidades en la agricultura. RTQ 42:70-93.
- Gonçalves, A. L. 2021. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles. Applied Sciences 11(2): 871. doi.org/10.3390/app11020871.
- Graham, A. E., and R. Ledesma. 2023. The microbial food revolution. Nat. Commun. 14:22-31. doi.org/10.1038/s41467-023-37891-1.
- Hamed, S., N. El-Gaml, and S.T. Eissa. 2022. Integrated biofertilization using yeast with cyanobacteria on growth and productivity of wheat. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 11(1):112. doi.org/10.1186/s43088-022-00288-y.
- Haoujar, I., F. Cacciola, J Abrini, D. Mangraviti, D. Giuffrida, Y. Oulad, A. Kounoun, N. Miceli, M. Taviano, L. Mondello, F. Rigano y N. Skali. 2019. La contribución de carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides a las propiedades antioxidantes de las microalgas marinas aisladas del Marruecos mediterráneo. Moléculas 24(22): 4037.
- Hassan, M. E., S.M. Mohafrash, S.A. Fallatah, A. E. El-Sayed, and A.T. Mossa. 2021. Eco-friendly larvicide of *Amphora coffeaeformis* and *Scenedesmus obliquus* microalgae extracts against *Culex pipiens*. Journal of Applied Phycology 33(4):2683–2693. doi:10.1007/s10811-021-02440-0.
- Junping, L., S. Liu, J. Feng, Q. Liu, J. Guo, L. Wang, X. Jiao, and S. Xie. 2020. Effects of microalgal biomass as biofertilizer on the growth of cucumber and microbial communities in the cucumber rhizosphere. Turkish Journal of Botany 44(2):167-177. doi.org/10.3906/bot-1906-1.
- Kahkashan, P., A. Najat, L. Bukhari, M. Luluah, A. Al Masoudi, A. Naser, W. Mashael, and F. Alruways. 2022. Antifungal potential, chemical composition of *Chlorella vulgaris* and SEM analysis of morphological changes in *Fusarium oxysporum*. Saudi Journal of Biological Sciences 29(4):2501-2505. doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.033.
- Kanchan, A., K. Simranjit, K. Ranjan, R. Prasanna, B. Ramakrishnan, M. Singh, M. Hasan, and Y. Shivay. 2019. Microbial biofilm inoculants benefit growth and yield of chrysanthemum varieties under protected cultivation through enhanced nutrient availability. Plant Biosyst. 153: 306–316. doi.org/10.1080/11263504.2018.1478904.
- Katila, P., P. Colfer, W. de Jong, G. Galloway, P. Pacheco, and G. Winkel (eds.). 2019. Sustainable development goals: Their impacts on forests and people. Cambridge University Press.
- Kholssi, R., E. Marks, J. Miñón, O. Montero, J. Lorentz, A. Debdoubi, and C. Rad. 2022. Biofertilizing Effects of *Anabaena cylindrica* biomass on the growth and nitrogen uptake of wheat. Communications in Soil Science and Plant Analysis 53(10):1216–1225. doi.org/10.1080/00103624.2022.2043350.
- Kumar, S., T. Korra, U. Singh, S. Singh, and K. Bisen. 2022. Microalgal based biostimulants as alleviator of biotic and abiotic stresses in crop plants. In New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering, Elsevier 2022:195-216. doi:10.1016/b978-0-323-85577-8.00013-5.
- Kusvuran, S. 2021. Microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijerinck) alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidant defense system. Horticultural Plant Journal 7(3):221-231. doi:10.1016/j.hpj.2021.03.007.
- Le Mire, G., A. Siah, B. Marolleau, M. Gaucher, C. Maumené, Y. Brotaux, and M. H. Jijakli. 2019. Evaluation of  $\lambda$ -Carrageenan, CpG-ODN, Glycine Betaine, *Spirulina platensis*, and ergosterol as elicitors for control of *Zymoseptoria tritici* in Wheat. Fitopatología 109(3):409-417. doi:10.1094/phyto-11-17-0367-r.
- López-Padrón, I., L. Martínez, G. Pérez, Y. Reyes, M. Núñez, y J. Cabrera. 2020. Las algas y sus usos en la agricultura. Una visión actualizada. Cultivos Tropicales 41:2.
- López, J. 2022. Aplicación de microalgas como biofertilizante en cultivo de albahaca Tesis (Trebball Final de Grau). UPC, Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona, Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/376504>.
- López-González D., D. Ledo, L. Cabeiras-Freijanes, M. Verdeguer, M.J. Reigosa, and A.M. Sánchez-Moreiras. 2020. Phytotoxic activity of the natural compound Norharmane on crops, weeds and model plants. Plants 9(10):13-28. doi.org/10.3390/plants9101328.
- Ma, F., Y. Li, X. Han, K. Li, M. Zhao, L. Guo, and Y. Xu. 2024. Microalgae-based biofertilizer improves fruit yield and controls greenhouse gas emissions in a hawthorn orchard. Plos one 8:1-19. doi.org/10.1371/journal.pone.0307774.

- Mamani, A. and M. Filippone. 2018. Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. Revista Agronómica del Noroeste Argentino 38(1): 9-21.
- Martelli, A., T. V. Zualet, M. B. Miras-Gagliardi, y T. Rubilar. 2024. Fitorremediación de efluentes acuícolas mediante el uso de seis microalgas marinas: aportes de sustentabilidad en la industria acuícola del erizo de mar en Argentina. Revista de Biología Tropical 72(2). doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v72is1.58979.
- Martínez, A. F. 2021. Encapsulación de Fisherella: TB22 con polímeros biodegradables para mejorar su aplicación como biofertilizante. Doctoral dissertation. Universidad del Mar. Extraído de: <http://coralito.umar.mx:8383/jspui/handle/123456789/272>.
- Martini, F., G. Beghini, L. Zanin, Z. Varanini, A. Zamboni, and M. Ballottari. 2021. The potential use of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella sorokiniana* as biostimulants on maize plants. Algal Res. 60:1-13. doi:10.1016/j.algal.2021.102515.
- Miranda, F. y V. Rosales. 2018. Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. 15. [http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2\\_Parte1\\_Eje3\\_Cap5-177-Garc%C3%ADa-Miranda.pdf?cv=1](http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-Garc%C3%ADa-Miranda.pdf?cv=1)
- Mukami, M., P. Shetty, and G. Maróti. 2023. Transcriptional analysis reveals induction of systemic resistance in tomato treated with *Chlorella* microalgae. Algal Res. 72:103-106. doi.org/10.1016/j.algal.2023.103106.
- Mutale, C., F. Rachidi, H. A. Mohamed, N. E. Mernissi, A. Aasfar, M. Barakate, and H. E. Arroussi. 2021. Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect on salinity tolerance mechanisms, nutrient uptake, and tomato plant growth under salt stress. Journal of Applied Phycology 33: 3779-3795. doi:10.1007/s10811-021-02559-0.
- Mutum, L., T. Janda, É. Darkó, G. Szalai, K. A. Hamow, and Z. Molnár. 2023. Outcome of microalgae biomass application on seed germination and hormonal activity in winter wheat leaves. Agronomy 13:3832-3838. doi.org/10.3390/agronomy13041088.
- Navarro-López, E., A. Ruiz-Nieto, A. Ferreira, F. G. Acién, and L. Gouveia. 2020. Biostimulant potential of *Scenedesmus obliquus* grown in brewery wastewater. Molecules 25:6-64. doi:10.3390/molecules25030664.
- Ortiz, I; M. Calijuri, R. Bastos, A. De Magalhães, J. Bepler, M. Bessas, y J. Silva. 2024. Tratamiento de efluentes domésticos con lagunas de alta tasa, evaluación del arranque con dos porcentajes de inóculo. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo 42(1):6-22. doi.org/10.14482/inde.42.01.001.414.
- Pérez-Madruga, Y., I. López-Padrón, y Y. Reyes-Guerrero. 2020. Las algas como alternativa natural para la producción de diferentes cultivos. Cultivos Tropicales 41(2).
- Plaza, B. M., C. Gómez-Serrano, F.G. Acién-Fernández, S. and Jimenez-Becker. 2018. Effect of microalgae hydrolysate foliar application (*Arthrosphaera platensis* and *Scenedesmus sp.*) on *Petunia x hybrida* growth. Journal of Applied Phycology 30(4):2359-2365. doi.org/10.1007/s10811-018-1427-0.
- Poulton, S. W., A. Bekker, V. Cumming, A. Zerkle, D. Canfield, and D. Johnston. 2021. A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. Nature 592:232-236. doi:10.1038/s41586-021-03393-7.
- Puglisi, I., E. La Bella., E. Rovetto, A. Lo Piero and A. Baglieri. 2020. Biostimulant efect and biochemical response in lettuce seedlings treated with a *Scenedesmus quadricauda* extract. Plants 9(1):1-23. doi.org/10.3390/plants9010123.
- Qian, L., and X. Yuao. 2022. From manure to high-value fertilizer: The employment of microalgae as a nutrient carrier for sustainable agriculture, Algal Res. 67:102. doi.org/10.1016/j.algal.2022.102855.
- Qingnan, C., L. Tao, X. Lihong, Y. Linzhang, F. Yanfang, S. Zhimin, Y. Bin, J. Robert, M. Cooper, and G. Pan. 2021. Hydrothermal carbonization of microalgae for phosphorus recycling from wastewater to crop-soil systems as slow-release fertilizers, Journal of Cleaner Production 283: 124-627. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124627.
- Rad, C., E. A. Marks, D. Pérez-Alonso, O. Montero, y M. Hernández. 2022. Cambios en la microbiota del suelo inducidos por la aplicación de biofertilizantes con microalgas. In Compostaje: Objetivo de Desarrollo Sostenible. 69-72.
- Rania, S., M. Rashwan, M. Doaa, and M. Hammad. 2020. Toxic effect of *Spirulina platensis* and *Sargassum vulgar* as natural pesticides on survival and biological characteristics of cotton leaf worm *Spodoptera littoralis*. Scientific African 8:03-23. doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00323.

- Rankic, I., R. Zelinka, A. Ridoskova, M. Gagic, P. Pelcova, and D. Huska. 2021. Nano/microparticles in conjunction with microalgae extract as novel insecticides against Mealworm beetles, *Tenebrio molitor*. *Scientific Reports* 11(1):17-125. doi:10.1038/s41598-021-96426-0.
- Refaay, D. A., E. M. El-Marzoki, M. I. Abdel-Hamid, and S. A. Haroun. 2021. Effect of foliar application with *Chlorella vulgaris*, *Tetradesmus dimorphus*, and *Arthrospira platensis* as biostimulants for common bean. *Journal of Applied Phycology* 33(6):3807-3815. doi.org/10.1007/s10811-021-02584-z.
- Reyes-Palomino, S. y D. Cano. 2022. Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas* 24(1):53-64. doi.org/10.18271/ria.2022.328.
- Righini, H., E. Baraldi, Y. García, A. Martel, and R. Roberti. 2019. Different antifungal activity of *Anabaena* sp., *Ecklonia* sp., and *Jania* sp. against *Botrytis cinerea*. *Marine Drugs* 17(5):299. doi.org/10.3390/MD17050299.
- Righini, H., O. Francioso, M. Di Foggia, A. Prodi, A. M. Quintana, and R. Roberti. 2021. Tomato seed bioprimería with water extracts from *Anabaena minutissima*, *Ecklonia maxima* and *Jania adhaerens* as a new agro-ecological option against *Rhizoctonia solani*. *Scientia Horticulturae* 281:1-11. doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109921.
- Román, J. R., B. Roncero, S. Chamizo, E. Rodríguez, and Y. Cantón. 2018. Restoring soil functions by means of cyanobacteria inoculation: importance of soil conditions and species selection. *Land Degradation & Development* 29(9):3184-3193. doi.org/10.1002/ldr.3064.
- Rossi, F., G. Mugnai, and R. De Philippis. 2018. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant Soil* 429:19-34. doi.org/10.1007/s11104-017-3441-4
- Rupawalla, Z., L. Shaw, I. Ross, S. Schmidt, B. Hankamer, and J. Wolf. 2022. Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants. *Algal Res.* 66:102. doi.org/10.1016/j.algal.2022.102784.
- Saber, A. A., S. M. Hamed, E. F. Abdel-Rahim, and M. Cantonati. 2018. Insecticidal prospects of algal and cyanobacterial extracts against the cotton leaf worm *Spodoptera littoralis*. *Vie et Milieu* 68(4):199-212.
- Sánchez-Quintero, A., S. C. M. Fernandes, and B. Jean-Baptiste. 2023. Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO<sub>2</sub> streams towards sustainable agriculture: A review. *Microbiological Research* 277:127-505. doi.org/10.1016/j.micres.2023.127505.
- Sandoval, I. A., M. T. Darwich Cedeño, W. A. Torres Munar, y L. C. Montenegro Ruiz. 2021. Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessrelly* y *Desmodesmus armatus*. *Mutis* 11(2):32-43. doi:10.21789/22561498.1755.
- Sartorello, Y., A. Pastorino, G. Bogliani, S. Ghidotti, R. Viterbi, and C. Cerrato. 2020. The impact of pastoral activities on animal biodiversity in Europe: A systematic review and meta-analysis. *Journal for Nature Conservation* 56:125-863. Doi: 10.1016/j.jnc.2020.125863.
- Schmid, B., L. Coelho, P. Schulze, H. Pereira, T. Santos, I. Maia, M. Reis, and J. Varela. 2022. Antifungal properties of aqueous microalgal extracts. *Bioresource Technology Reports* 18(10):10-96. doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101096.
- Sebnem, K. 2021. Microalgae *Chlorella vulgaris* Beijerinck alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidative defense system. *Horticultural Plant Journal* 7(3):221-231. doi.org/10.1016/j.hpj.2021.03.007.
- Shah, M. 2013. Agricultura sostenible en el siglo XXI Seguridad alimentaria, biocombustibles y cambio climático. *Palmas* 34: 273-280.
- Sharma, G. K., S. Khan, M. Shrivastava, R. Bhattacharyya, A. Sharma, D. Gupta, and N. Gupta. 2021. Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management* 287:112-295. doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295.
- Shen, Y., W. Zhu, H. Li, S. Ho, J. Chen, and Y. Xie. 2018. Enhancing cadmium bioremediation by a complex of water-hyacinth derived pellets immobilized with *Chlorella* sp. *Bioresour. Technol.* 257:157-163. doi:10.1016/j.biortech.2018.02.060.
- Shisy, J., A. Munir, R. Nirmal, B. Faizal, and K. Sheena. 2024. Cyanobacteria-green microalgae consortia enhance soil fertility and plant growth by shaping the native soil microbiome of *Capsicum annuum*. *Rhizosphere* 30:100-892. doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100892.
- Song, X., J. Zhang, C. Peng, and D. Li. 2021. Replacing nitrogen fertilizer with nitrogen-fixing cyanobacteria reduced nitrogen leaching in red soil paddy fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 312:107-320. doi:10.1016/j.agee.2021.107320.

- Stefanski, F., A. Camargo, T. Scapini, C. Bonatto, B. Venturin, S. Weirich, and H. Treichel. 2020. Potential use of biological herbicides in a circular economy context: a sustainable approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4(5):21-102. doi:10.3389/fsufs.2020.521102.
- Supraja, K., B. Behera, and P. Balasubramanian. 2020. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial Crops and Products* 151:112-453. doi: org/10.1016/j.indcrop.2020.112453.
- Toribio, A. J., F. Suárez, M. M. Jurado, M. J. López, J. A. López-González, and J. Moreno. 2020. Prospection of cyanobacteria producing bioactive substances and their application as potential phytostimulating agents. *Biotechnology Reports* 26:00-49. doi. org/10.1016/J.BTRE.2020.E00449.
- Viegas, C., L. Gouveia, and M. Gonçalves. 2021. Evaluation of microalgae as bioremediation agent for poultry effluent and biostimulant for germination. *Environmental Technology & Innovation* 24:102-048. doi.org/10.1016/j. eti.2021.102048.
- Wang, L. X. Yang, and Y. Jiaguo. 2021. Hydrogen-bond activation of N<sub>2</sub> molecules and photocatalytic nitrogen fixation. *Chem.* 7:1983-1985. doi.org/10.1016/j. chempr.2021.07.009.
- Wilson, S., N. Alavi, D. Pouliot, and G. Mitchell. 2020. Similarity between agricultural and natural land covers shapes how biodiversity responds to agricultural expansion at landscape scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 301: 107-052. Doi: 10.1016/J. AGEE.2020.107052.
- Wu, W., T. Ke, X. Zhou, Q. Li, Y. Tao, and Y. Zhang. 2022. Synergistic remediation of copper mine tailing sand by microalgae and fungi. *Appl. Soil Ecol.* 175:104-453. doi:10.1016/j. apsoil.2022.104453.
- Zareen, T. 2020. Phosphorus removal from landfill leachate by microalgae. *Biotechnology Reports* 25:04-19. doi.org/10.1016/j.btre.2020. e00419.
- Zhongyi, Z. X. Mei, F. Yong, Z. Lunyu, and W. Hui. 2024. Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of The Total Environment* 912:169-424. doi.org/10.1016/j. scitotenv.2023.169424.

