



Potencial bioestimulante de microalgas en agricultura hidropónica en zonas áridas y semiáridas

Biostimulant potential of microalgae in hydroponic agriculture in arid and semi-arid areas

- ¹ Leonardo Andrés Zambrano Ganchozo  <https://orcid.org/0009-0002-7483-190X>
Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Manabí, Ecuador.
Maestría en Agronomía, mención Producción Agrícola Sostenible
lzambrano8477@utm.edu.ec
- ² Roberto Bravo-Zamora  <https://orcid.org/0000-0001-9648-6890>
Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Manabí, Ecuador.
roberto.bravo@utm.edu.ec

Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado:15//03/2026

Revisado:22/04/2026

Aceptado:04/05/2026

Publicado:03/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i2.3686>

Cítese: Zambrano Ganchozo, L. A., & Bravo Zamora, R. (2026). Potencial bioestimulante de microalgas en agricultura hidropónica en zonas áridas y semiáridas. *Ciencia Digital*, 10(2), 219 - 238. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i2.3686>



**Ciencia
Digital**
Editorial

CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

<p>Palabras claves: Regulación hormonal; tolerancia al estrés abiótico; cultivos sin suelo; nutrición vegetal; productividad agrícola.</p>	<p>Resumen</p> <p>Introducción: el uso de microalgas como bioestimulantes ha cobrado relevancia en la agricultura hidropónica, especialmente en contextos áridos y semiáridos donde el estrés ambiental limita la productividad. Objetivo: realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre el uso de microalgas como bioestimulantes en sistemas de agricultura hidropónica aplicados en zonas áridas y semiáridas, con el objetivo de integrar la evidencia disponible, identificar patrones fisiológicos y agronómicos relevantes, y aportar un marco de referencia que contribuya al desarrollo de estrategias productivas sostenibles bajo condiciones de estrés ambiental. Metodología: se desarrolló una revisión sistemática cualitativa bajo el modelo PRISMA 2020, analizando estudios indexados publicados entre 2021 y 2025, con criterios centrados en el uso de microalgas en cultivos hidropónicos y la evaluación de variables productivas y fisiológicas en condiciones de estrés hídrico y salino. Resultados: la aplicación de microalgas, principalmente <i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Scenedesmus</i> spp. y <i>Spirulina (Arthrospira platensis)</i>, evidenció incrementos en biomasa, área foliar y rendimiento, así como mejoras en fotosíntesis, contenido de clorofila, actividad antioxidante y absorción de nutrientes, destacando su efecto positivo en condiciones de aridez. Conclusión: las microalgas representan una alternativa bioestimulante eficaz para mejorar la resiliencia fisiológica y la sostenibilidad de sistemas hidropónicos en zonas áridas y semiáridas, siempre que su aplicación se adapte a las condiciones del sistema y del entorno. Área de estudio general: Ciencias agrarias. Área de estudio específica: Agricultura hidropónica. Tipo de estudio: Revisión bibliográfica sistemática.</p>
<p>Keywords: Hormonal regulation; abiotic stress tolerance; soilless crops; plant nutrition; agricultural productivity.</p>	<p>Abstract</p> <p>Introduction: the use of microalgae as biostimulants has gained relevance in hydroponic agriculture, particularly in arid and semi-arid environments where environmental stress constrains productivity. Objective: to conduct a systematic review of scientific literature on the use of microalgae as biostimulants in hydroponic agriculture systems applied in arid and semi-arid regions, with the aim of integrating available evidence, identifying relevant physiological and agronomic patterns, and providing a reference framework to support the development of sustainable production strategies under environmental stress conditions. Methodology: a</p>

qualitative systematic review was conducted following PRISMA 2020 guidelines, analyzing indexed studies published between 2021 and 2025, based on criteria related to the use of microalgae in hydroponic crops and the evaluation of productive and physiological variables under water and saline stress conditions. **Results:** the application of microalgae, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* spp., and *Spirulina (Arthrospira platensis)*, showed consistent increases in biomass, leaf area, and yield, along with improvements in photosynthetic efficiency, chlorophyll content, antioxidant activity, and nutrient uptake, particularly under arid conditions. **Conclusion:** microalgae represent an effective biostimulant tool to enhance physiological resilience and sustainability in hydroponic systems in arid and semi-arid regions, provided their application is properly adapted to system design and environmental conditions. **General Area of Study:** Agricultural Sciences. **Specific Area of Study:** Hydroponic agriculture. **Type of study:** Systematic literature review.

1. Introducción

La producción agrícola en zonas áridas y semiáridas enfrenta desafíos estructurales asociados a la escasez de recursos hídricos, la degradación progresiva de los suelos y la limitada capacidad de estos ecosistemas para sostener sistemas productivos intensivos de manera continua, factores que condicionan la estabilidad del rendimiento y la eficiencia en el uso de insumos (Tsafaras et al., 2021; Hegazy et al., 2022; Barreno et al., 2020). Estas restricciones obligan a replantear los modelos convencionales de producción e incorporar estrategias tecnológicas orientadas a mejorar la eficiencia fisiológica vegetal y la resiliencia frente al estrés hídrico y salino (Kapoor et al., 2021; Valero et al., 2023; Guapi et al., 2024).

En este escenario, la agricultura sin suelo, particularmente la hidroponía, ha cobrado

relevancia como alternativa técnica viable al permitir un control preciso de la nutrición vegetal, una reducción significativa del consumo de agua y una mayor uniformidad en el crecimiento de los cultivos (Casey et al., 2022; Regmi et al., 2024; Loroña et al., 2020). Asimismo, los sistemas hidropónicos cerrados facilitan la optimización del nexo agua–nutrientes–energía, mejorando la eficiencia productiva en ambientes con restricciones edafoclimáticas severas (Karimzadeh et al., 2025; Renganathan et al., 2024; Briones et al., 2021). La evidencia indica que estos sistemas pueden incrementar la productividad en condiciones de limitación hídrica cuando se implementan diseños tecnológicos adecuados (Tsafaras et al., 2021; Nejatian et al., 2025; Cruz et al., 2024).

Dentro de este marco tecnológico, las microalgas emergieron como una fuente promisoría de bioestimulantes agrícolas debido a su capacidad para sintetizar fitohormonas, aminoácidos, polisacáridos y compuestos antioxidantes con actividad fisiológica comprobada (Toscano et al., 2018; Kapoore et al., 2021). Estos metabolitos intervienen en la regulación del crecimiento vegetal, la activación de rutas fotosintéticas y la mejora en la absorción de nutrientes, favoreciendo incrementos en biomasa y eficiencia fotosintética bajo condiciones de estrés abiótico (González-Pérez et al., 2021; Senousy et al., 2023). Estudios recientes confirman que los bioestimulantes microalgales modulan mecanismos antioxidantes y promueven tolerancia al estrés hídrico y salino en distintos cultivos hortícolas (Senousy et al., 2023; Moon et al., 2024).

Diversas investigaciones experimentales documentaron efectos positivos de especies como *C. vulgaris*, *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) y *Scenedesmus* spp. sobre el crecimiento vegetal y la estabilidad del rendimiento en condiciones de estrés ambiental (Bonatelli et al., 2021; Gharib et al., 2024). La aplicación de extractos de *C. vulgaris* demostró mejorar la absorción de nutrientes y la eficiencia fisiológica en sistemas sin suelo (Vieira et al., 2025; Marka et al., 2026), mientras que formulaciones basadas en *A. platensis* evidenciando efectos positivos en la mitigación del estrés salino y en la protección antioxidante de tejidos vegetales (Mostafa et al., 2024a; Touzout et al., 2025). De igual manera, tratamientos

con *Scenedesmus* spp. mostraron capacidad de restaurar parámetros fisiológicos en plántulas sometidas a estrés salino en cultivos hortícolas (Liu et al., 2025; Memeli et al., 2025).

Adicionalmente, la integración de microalgas en sistemas hidropónicos se vincula con enfoques de bioeconomía circular, al permitir el reciclaje de nutrientes provenientes de efluentes agrícolas y la valorización de biomasa residual en esquemas productivos cerrados (Barros et al., 2022; Morillas-España et al., 2024). La combinación de tratamiento de aguas residuales y producción microalgal constituye una estrategia sostenible que reduce pérdidas de nitrógeno y fósforo, optimiza recursos y disminuye impactos ambientales (Salazar et al., 2021; Salazar et al., 2023). Sin embargo, pese al avance experimental, los resultados reportados muestran variabilidad en función de la especie utilizada, el método de extracción y las condiciones ambientales de aplicación, lo que evidencia la necesidad de sistematizar la información disponible (Li et al., 2022; Zhang et al., 2024).

A pesar del creciente volumen de estudios, aún no existe una integración comparativa que permita evaluar de manera estructurada la eficacia relativa de las distintas especies microalgales, sus mecanismos fisiológicos de acción y su aplicabilidad técnica en sistemas hidropónicos desarrollados en zonas áridas y semiáridas. Esta ausencia de síntesis limita la transferencia tecnológica y dificulta la formulación de estrategias productivas basadas en evidencia científica

consolidada (Kapooore et al., 2021; Renganathan et al., 2024).

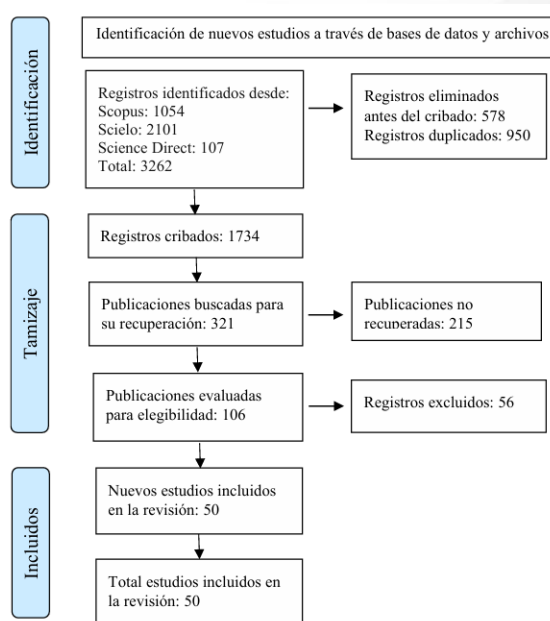
En consecuencia, el presente artículo se propone realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre el uso de microalgas como bioestimulantes en sistemas de agricultura hidropónica aplicados en zonas áridas y semiáridas, con el objetivo de integrar la evidencia disponible, identificar patrones fisiológicos y agronómicos relevantes, y aportar un marco de referencia que contribuya al desarrollo de estrategias productivas sostenibles bajo condiciones de estrés ambiental.

2. Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, mediante una revisión sistemática de literatura científica, siguiendo los lineamientos PRISMA 2020 como se muestra en la **Figura 1**, lo que permitió una selección transparente y reproducible de los estudios (Page et al., 2021). Se adoptó un diseño no experimental, descriptivo y transversal, acorde con Hernández et al. (2014) pertinente para la síntesis de conocimiento en campos en consolidación.

Figura 1

Flujograma PRISMA para la selección de artículos



La revisión se centró en estudios sobre el uso de microalgas, particularmente *Chlorella*, *Spirulina* y *Scenedesmus*, como bioestimulantes en cultivos hidropónicos en zonas áridas y semiáridas. El proceso metodológico se estructuró en cuatro etapas:

Identificación: se realizó una búsqueda en *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SciELO* y *Redalyc*, considerando publicaciones entre 2021 y 2025; se emplearon operadores booleanos en español e inglés y se aplicaron filtros para artículos revisados por pares con acceso completo.

Selección: se eliminaron duplicados y se excluyeron estudios no pertinentes; se revisaron títulos, resúmenes y palabras clave para determinar su relevancia respecto al objetivo.

Elegibilidad: los artículos fueron evaluados considerando especie microalgal, sistema hidropónico, contexto

agroclimático y variables agronómicas; se valoró la calidad metodológica mediante el *checklist* del *Joanna Briggs Institute*, incluyendo únicamente estudios en hidroponía y condiciones de estrés hídrico, y excluyendo investigaciones en suelo o sin rigor metodológico.

Inclusión y análisis: los estudios seleccionados se organizaron en una matriz documental con variables clave; posteriormente, se realizó una síntesis cualitativa, identificando patrones, tendencias y vacíos de investigación.

3. Resultados

La presente sección sintetiza los hallazgos derivados del análisis de 50 artículos científicos publicados entre 2021 y 2025, enfocados en el uso de microalgas como bio estimulantes en sistemas hidropónicos y cultivos sin suelo; en conjunto, se evidencian patrones consistentes, junto con ciertas diferencias metodológicas y vacíos aún presentes en la literatura. Se observa una tendencia creciente de publicaciones a partir de 2023, con mayor concentración en 2024 y 2025, lo que refleja un interés científico en expansión hacia alternativas sostenibles frente a la fertilización convencional, particularmente en escenarios de estrés hídrico y salino. Geográficamente, los estudios se concentran en Europa mediterránea, Asia y regiones del norte de África y Medio Oriente, contextos donde la escasez de agua y la salinidad condicionan los sistemas productivos; en cuanto a los sistemas evaluados, predominan DWC, NFT y sistemas *soilless* con sustratos inertes, mientras que en menor medida se

integran enfoques como acuaponía y sistemas verticales.

En relación con los cultivos, destaca *Lactuca sativa* L., seguida de *Solanum lycopersicum* L. y *Cucumis sativus* L., junto con otras especies hortícolas de ciclo corto, lo que evidencia un enfoque en cultivos de alta rotación. Respecto a las microalgas, predomina *C. vulgaris*, seguida de *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) y *Scenedesmus* spp., aplicadas como extractos, biomasa o suspensiones, lo que sugiere una etapa aún exploratoria en su estandarización técnica; adicionalmente, una proporción significativa de estudios incorpora condiciones de estrés ambiental, tales como salinidad o déficit hídrico, lo que refuerza la validez de los hallazgos para zonas áridas y semiáridas y confirma el potencial de estos bioinsumos para mejorar la resiliencia de los sistemas hidropónicos.

3.1. Revisión de la evidencia científica sobre la aplicación de microalgas en cultivos hortícolas hidropónicos

La evidencia muestra que la aplicación de microalgas en sistemas hidropónicos se asocia con mejoras en crecimiento y productividad vegetal, especialmente cuando se emplean como extractos en dosis intermedias. Estos efectos sugieren un rol complementario a la fertilización convencional, más que su sustitución.

Diversos estudios recientes ampliaron la comprensión del papel de las microalgas como bioestimulantes en contextos agrícolas complejos, particularmente en ambientes con limitaciones edáficas y climáticas. En este sentido, la investigación de Alghamdi et al. (2023) demuestra que la

inoculación de *Spirulina platensis* en compost humificado no solo mejora las propiedades hidro-físico-químicas del suelo rizosférico, sino que incrementa significativamente el rendimiento y la calidad del forraje en condiciones áridas y salinas, lo que sugiere un efecto sinérgico entre materia orgánica y biomasa microalgal. Este hallazgo se complementa con lo reportado por Dagnaisser et al. (2022) quienes destacan el rol de las microalgas no solo como biofertilizantes, sino también como herramientas integrales para la remediación de aguas residuales y la mitigación de carbono, configurando un enfoque multifuncional alineado con la agricultura sostenible. En conjunto, estos estudios evidencian que el impacto de las microalgas trasciende el ámbito fisiológico vegetal, incidiendo también en la calidad del entorno productivo.

En sistemas controlados y fases iniciales del desarrollo vegetal, los efectos bioestimulantes adquieren una dimensión más específica. Alling et al. (2023) evidencian que extractos de microalgas nórdicas promueven la germinación de semillas de tomate y cebada, incrementando la uniformidad y velocidad de emergencia, lo que sugiere la presencia de compuestos reguladores del crecimiento en etapas tempranas. De manera similar, Chabili et al. (2024) indican que la eficacia bioestimulante de *Chlorella vulgaris* depende en gran medida del método de extracción utilizado, ya que diferentes técnicas permiten liberar metabolitos con distinta actividad fisiológica; esta variabilidad metodológica introduce un elemento crítico en la estandarización de

bioinsumos. Asimismo, Ammaturo et al. (2023) reportan mejoras en el crecimiento de lechuga mediante el uso combinado de *Chlorella vulgaris* y *Ulva lactuca*, evidenciando que la interacción entre distintas especies microalgales puede potenciar la respuesta vegetal, posiblemente a través de una mayor diversidad de compuestos bioactivos.

Desde una perspectiva nutricional y de eficiencia en el uso de recursos, los estudios de Alvarenga et al. (2023) y Castro et al. (2024) aportan evidencia relevante sobre el potencial fertilizante de las microalgas cultivadas en aguas residuales agrícolas. En particular, Alvarenga et al. (2023) demuestran que *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* cultivadas en drenajes de maíz presentan una capacidad significativa para aportar nutrientes esenciales a los cultivos, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos. Castro et al. (2024) por su parte evidencian que incluso tras procesos de digestión anaerobia, la biomasa microalgal mantiene su capacidad biofertilizante, lo que abre la posibilidad de integrar estos sistemas en esquemas de economía circular. En la misma línea, Álvarez-Gil et al. (2023) destacan el aprovechamiento de aguas residuales de invernadero para la producción de bioestimulantes microalgales, consolidando un modelo de reciclaje de nutrientes que optimiza la sostenibilidad del sistema hidropónico.

Cabe resaltar que, el efecto bioestimulante de compuestos específicos derivados de microalgas fueron abordados con mayor profundidad en estudios recientes. Fadia et al. (2023) comparan distintas categorías de

polisacáridos, evidenciando que estos compuestos influyen de manera diferenciada en el crecimiento y la nutrición del tomate, lo que sugiere mecanismos de acción asociados a la señalización metabólica y la absorción de nutrientes. De forma complementaria, Bauenova et al. (2024) demuestran que cepas de cianobacterias pueden actuar como bioestimulantes eficaces en arroz bajo condiciones salinas, mejorando el crecimiento vegetal y la tolerancia al estrés, lo que amplía el espectro de organismos fotosintéticos con potencial agrícola. En conjunto, estos resultados permiten inferir que la efectividad de las microalgas no depende únicamente de su aplicación como biomasa, sino de la naturaleza de sus metabolitos activos, la forma de extracción y el contexto ambiental en el que se utilizan, consolidando su papel como insumos estratégicos en la intensificación sostenible de la agricultura.

Los incrementos en biomasa varían entre 15% y 150%, mientras que resultados negativos se presentan en co-cultivos no optimizados o sin control técnico adecuado tal como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Efectos de la aplicación de microalgas en variables productivas de cultivos hidropónicos

Autor(es)	Especie microalgal	Cultivo	Dosis / forma de aplicación	Variable evaluada	Resultado cuantitativo	Efecto
La Bella et al. (2021)	<i>C. vulgaris</i>	Lechuga	Extracto foliar (≈1 mg C org L ⁻¹)	Peso fresco foliar	+23% vs control	Incremento

Tabla 1 (Continuación)
Efectos de la aplicación de microalgas

Autor(es)	Especie microalgal	Cultivo	Dosis / forma de aplicación	Variable evaluada	Resultado cuantitativo	Efecto
Puglisi et al. (2022)	<i>C. vulgaris</i>	Lechuga	Foliar vs drench	Materia seca	Incremento significativo en ambos métodos	Incremento
Varia et al. (2022)	<i>A. platensis</i>	Lechuga	Extracto rico en ficocianina	Biomasa aérea	+18–25%	Incremento
Özer & Mismil et al. (2022)	<i>C. vulgaris</i> (viva)	Menta	Co-cultivo DWC	Ganancia de peso	0.47 g (con aireación) vs 0.22 g (sin)	Incremento condicionado
Dasgan et al. (2023)	<i>C. vulgaris</i>	Lechuga	Inoculación cada 10 días	Rendimiento comercial	Incremento significativo	Incremento
Gitau et al. (2022)	<i>Chlorophyta</i> spp.	Tomate	Suspensión	Biomasa total	Resultado cuantitativo	Efecto
Memeli et al. (2025)	<i>Scenedesmus</i> sp.	Lechuga viva	Biomasa viva	Peso fresco	+20–35%	Incremento
Francioso et al. (2024)	Preparado microalgal	Lechuga	Priming radicular	Biomasa total	+15–40%	Incremento
Marka et al. (2026)	<i>C. vulgaris</i>	Lechuga	Extracto CV10–CV50	Peso fresco	Incremento bajo fertilización reducida	Incremento
Vieira et al. (2025)	<i>C. vulgaris</i>	Lechuga	Suspensión 5 g L ⁻¹	Área foliar	Incremento significativo bajo salinidad	Incremento
Pathom-Aree et al. (2024)	<i>Chlorella</i> sp.	Lechuga	Co-cultivo DWC	Biomasa	Mitigación de pérdidas por salinidad	Incremento relativo
Žunić et al. (2022)	<i>C. vulgaris</i>	Acelga	Co-cultivo vivo	Producción	+67.4%	Incremento

Los estudios analizados coinciden en señalar incrementos consistentes en el rendimiento y crecimiento vegetal cuando las microalgas se aplican como extractos o

suspensiones, particularmente en lechuga hidropónica, donde se concentran los mayores volúmenes de evidencia. En este

cultivo, los aumentos en peso fresco foliar superan frecuentemente el 20%, alcanzando valores superiores al 60% en aplicaciones semanales de *C. vulgaris* a concentraciones elevadas, como reportan Vieira et al. (2025). De forma complementaria, trabajos como los de La Bella et al. (2021) y Puglisi et al. (2022) demuestran que tanto la vía foliar como la radicular generan respuestas positivas, aunque con diferencias temporales y metabólicas, lo que refuerza la plasticidad de estos bioinsumos en sistemas sin suelo. En contraste, los ensayos basados en co-cultivo de microalgas vivas muestran resultados más heterogéneos. Mientras Özer & Mismilet al. (2022) y Memeli et al. (2025) reportan incrementos de biomasa bajo condiciones de aireación adecuada o fertilización reducida, Pathom-Aree et al. (2024) evidencian reducciones cercanas al 50% cuando el sistema no es ajustado a la competencia por nutrientes y oxígeno. Este contraste subraya que los efectos productivos positivos no dependen únicamente de la presencia de microalgas, sino del diseño operativo del sistema hidropónico.

3.2. Especies microalgales y mecanismos de acción sobre variables fisiológicas y productivas

En los estudios incluidos, la relación entre microalgas y desempeño del cultivo no se limita a un aumento “final” de biomasa; con frecuencia se reportan cambios fisiológicos intermedios que permiten

inferir mecanismos funcionales. Para dar cumplimiento al objetivo, los resultados se organizan por especie/grupo microalgal y por variable fisiológica clave: (i) actividad fotosintética y pigmentos; (ii) respuesta antioxidante y daño oxidativo; (iii) absorción/asimilación de nutrientes y metabolismo C/N; (iv) rasgos radicales y eficiencia de captación; además, se distingue si la evidencia proviene de ensayo experimental directo o de aproximaciones moleculares (transcriptómica / metabolómica) tal como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Relación entre especies microalgales y mecanismos fisiológicos reportados

Especie microalgal / bioproducto	Compuestos bioactivos reportados	Variable fisiológica afectada	Magnitud del efecto observada	Evidencia Experimental
<i>C. vulgaris</i> (extracto foliar)	Mezcla de compuestos solubles con efecto señalizador metabólico	Ajuste osmótico y activación antioxidante bajo salinidad	Mitigación del estrés salino; incremento de fenoles y flavonoides, junto con acumulación de azúcares y aminoácidos compatibles	Si
<i>C. vulgaris</i> (extracto; aplicación foliar vs radicular)	Modulación diferencial de enzimas del metabolismo del nitrógeno (foliar) y del carbono (radicular)	Metabolismo C/N, pigmentos y contenido proteico	Aumento significativo de materia seca, clorofila total, carotenoides vegetal en ambas vías de aplicación	Si
<i>C. vulgaris</i> (suspensión en cultivo sin suelo)	Biomasa rica en nutrientes y fracciones bioactivas	Absorción y acumulación mineral en tejidos	Incremento de N (+44,9%), P (+96,4%), K (+59,5%) y Fe (+43,8%) en parte aérea	Si
<i>C. vulgaris</i> (extracto en microgreens)	Extracto acuoso caracterizado analíticamente	Pigmentación y establecimiento temprano	Incremento de clorofila b (+32%), germinación (+7%) y elongación de hipocótilo (+20%)	Si
<i>C. vulgaris</i> (sobrenadante libre de células)	Metabolitos solubles bioactivos	Regulación estomática y tolerancia a sequía	Inducción de cierre estomático y reducción de la pérdida de agua foliar	Si
<i>S. obliquus</i> (suspensión)	Biomasa con compuestos antioxidantes y señales metabólicas	Pigmentos fotosintéticos y daño oxidativo bajo estrés salino alcalino	Recuperación de clorofila total (+35,42%) y reducción de MDA (-26,31%) tras estrés severo	Si

Tabla 2 (Continuación)
Relación entre especies microalgales y mecanismos fisiológicos reportados

Especie microalgal / bioproducto	Compuestos bioactivos reportados	Variable fisiológica afectada	Magnitud del efecto observada	Evidencia Experimental
<i>Scenedesmus</i> spp. (extracto foliar)	Fraciones bioactivas derivadas de biomasa	Clorofila y crecimiento bajo estrés	Incremento de clorofila (9–11%) y peso fresco de brote (12–13%) en plantas estresadas	Si
<i>Scenedesmus</i> spp. (bioproductos procesados)	Fraciones bioactivas obtenidas por ruptura celular	Arquitectura y desarrollo radical	Aumento del enraizamiento hasta 160% y del desarrollo radical máximo hasta 275%	Si
Preparado microalgal comercial (mezcla)	Composición elemental y lipídica caracterizada	Clorofila, proteína y equilibrio iónico bajo NaCl	Incremento de biomasa, proteína y clorofila; reducción de peroxidación lipídica: ↑K ⁺ y ↓Na ⁺	Si
<i>A. platensis</i> (extracto rico en ficocianina)	Ficocianina como compuesto dominante	Rendimiento y entorno microbiológico del sistema	Aumento del rendimiento (+12,5%), reducción del ciclo productivo (-6 días) y disminución de carga bacteriana (-62%)	Si
<i>A. platensis</i> (polisacáridos EPS/BPS)	Exopolisacárido y endopolisacáridos	Desarrollo radical y absorción de fósforo	Incremento de longitud radical (+87%), peso de raíz (+75%) y absorción de P (+190%)	Si
<i>A. platensis</i> + <i>C. vulgaris</i> (extractos combinados)	Extractos acuosos al 10% (mezcla 1:1)	Crecimiento bajo irrigación salina	A 7 dS/m: mayor altura de planta (28,5 cm), peso fresco (5,53 g) y peso seco (0,42 g) frente al control salino	Si
<i>Chlorella</i> spp. y <i>Scenedesmus</i> spp. (análisis transcriptómico)	Señalización hormonal y rutas de crecimiento	Reprogramación molecular asociada a vigor vegetal	Activación diferencial de 7 197 transcritos (<i>Chlorella</i>) y 7 118 transcritos (<i>Scenedesmus</i>)	Si (nivel molecular)

En el corpus analizado, *C. vulgaris* aparece como la microalga con mayor diversidad de evidencia mecanística, ya que los estudios no solo reportan incrementos productivos, sino también marcadores fisiológicos intermedios asociados a eficiencia funcional del cultivo en sistemas

sin suelo. A nivel de nutrición y asimilación mineral, destaca el incremento explícito de macronutrientes y hierro en parte aérea de lechuga cuando se aplican suspensiones de *Chlorella* en cultivo sin suelo, con aumentos de N (+44.9%), P (+96.4%), K (+59.5%) y Fe (+43.8%), lo que constituye un indicador directo de absorción o acumulación mineral tisular. Paralelamente, el abordaje comparativo de vías de aplicación (foliar vs drench) muestra que ambas rutas incrementan materia seca y pigmentos, pero con diferencias en la direccionalidad metabólica, en tanto la vía foliar se asocia más a rutas de metabolismo del nitrógeno y la vía radicular a metabolismo del carbono, fenómeno coherente con una modulación de la eficiencia C/N en condiciones controladas. En microgreens, el efecto sobre establecimiento temprano y pigmentos se expresa en aumentos de germinación (+7%), elongación de hipocótilo (+20%) y clorofila b (+32%), lo que evidencia que, incluso en fases iniciales, se observa una respuesta fisiológica medible y no únicamente un incremento morfológico tardío. Complementariamente, el estudio mecanístico en *Arabidopsis* con sobrenadante libre de células documenta señales de tolerancia a sequía vinculadas con cierre estomático y menor pérdida de agua, aportando una base explicativa para interpretar hallazgos en estrés osmótico dentro de hidroponía, aunque el modelo no sea hortícola.

En contraste, el grupo *Scenedesmus*/*Tetrademus* destaca por resultados particularmente claros en

variables fotosintéticas y daño oxidativo, sobre todo bajo estrés. En pepino sometido a estrés salino–alcalino, se reporta una caída severa del “pool” fotosintético (reducciones de clorofila a, b y total de hasta 59–69% en el estrés más intenso), seguida de una recuperación notable cuando se aplica *Scenedesmus obliquus* a la dosis considerada óptima, con incrementos de clorofila total de +35.84% (60 mM) y +41.82% (90 mM), además de una reducción del daño oxidativo (MDA) de 25.91–30.86%, perfil que vincula de forma directa microalga–pigmentos–integridad de membranas. En lechuga, la evidencia con biomasa dominada por *Scenedesmus* aplicada foliarmente reporta incrementos de clorofila cercanos a 9–11% bajo estrés y aumentos de peso fresco de brote de 12–13%, lo que sugiere fortalecimiento del aparato fotosintético y traducción productiva en biomasa cosechable. Además, cuando se aislan fracciones bioactivas mediante procesamiento downstream, el efecto más cuantificado se concentra en arquitectura radical, con valores de enraizamiento de 160% y máximos de desarrollo radical de 275%, mecanismo que, aunque indirecto, es central en hidroponía por su relación con absorción de agua y nutrientes. Finalmente, los productos basados en *Spirulina/Arthrospira* tienden a reportar mecanismos asociados a compuestos específicos (ficocianina; polisacáridos), con efectos que oscilan entre cambios del entorno microbiano (–62% de población bacteriana en el sistema) y mejoras extremas en raíz y fósforo (+757% en peso de raíz; +190% en absorción de P),

delineando un perfil funcional más marcado hacia regulación del entorno y de la captación nutrimental, particularmente bajo condiciones de estrés salino.

3.3. Comparación de estudios en zonas áridas y semiáridas

Este apartado sintetiza los resultados de los estudios que evaluaron la aplicación de microalgas en contextos áridos y semiáridos reales, así como aquellos que simularon estrés hídrico y/o salino bajo condiciones controladas, con el propósito de identificar regularidades en la respuesta fisiológica y productiva de los cultivos hidropónicos. El énfasis se sitúa en tres dimensiones: (i) eficiencia fotosintética y estabilidad pigmentaria; (ii) tolerancia al estrés hídrico y salino; (iii) estabilidad del rendimiento bajo escenarios de limitación ambiental tal como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Efectos de microalgas en cultivos hidropónicos bajo estrés hídrico y salino

Autor (es)	Zona climática / contexto	Tipo de estrés	Especie microalgal	Respuesta fisiológica	Resultado productivo
Francioso et al. (2024)	Mediterránea (Italia)	Salinidad (0 100 mM NaCl)	Preparado microalgal (MR)	↓ peroxidación lipídica; ↑ clorofila y proteínas; ↑ K ⁺ / ↓ Na ⁺	↑ biomasa bajo salinidad
Marka et al. (2025)	Mediterránea (Grecia)	Salinidad	<i>C. vulgaris</i> (extracto)	↑ fenoles, flavonoides; ajuste osmótico	Mitigación del descenso de crecimiento
Liu et al. (2025)	China (estrés controlado)	Salino alcalino (60 90 mM)	<i>S. obliquus</i>	Recuperación de clorofilas (+35 42%); ↓ MDA (–26–31%)	Restauración parcial del crecimiento
Dasgan et al. (2023)	Mediterránea semiárida (Turquía)	Manejo hídrico / calidad de agua	<i>C. vulgaris</i>	↑ antioxidantes; ↑ clorofila	↑ rendimiento y calidad

Tabla 3 (continuación)
Efectos de microalgas en cultivos hidropónicos bajo estrés hídrico y salino

Özer & Mismilet al. (2022)	Condición controlada	Estrés fisiológico o radicular	<i>C. vulgaris</i> (viva)	Mejor ambiente radicular con aireación	↑ ganancia de peso
Pathom-Aree et al. (2024)	Tropical con estrés osmótico potencial	EC elevada	<i>Chlorella</i> sp. (viva)	Competencia microalga-planta	↓ crecimiento (~50%)
Kusvuran (2021)	Estrés hídrico simulado	Déficit hídrico	<i>C. vulgaris</i>	↑ clorofilas (6 60%); ↓ MDA (10 39%)	↑ crecimiento (9-132%)
Moon et al. (2024)	Sequía simulada	Estrés hídrico	<i>C. vulgaris</i> (CFS)	Cierre estomático; ↓ pérdida de agua	↑ tolerancia a sequía
Mostafa et al. (2024)	Región árida (Egipto)	Salinidad	<i>A. platensis</i>	↑ antioxidantes; ↑ fotosíntesis	↑ productividad de tomate
Chaudhuri & Balasubramanian (2025)	India (salinidad)	Salinidad	EPS de <i>A. platensis</i>	↑ eficiencia fisiológica	↑ productividad (18-27%)

Los estudios desarrollados en regiones áridas y semiáridas reales, particularmente en el Mediterráneo, Medio Oriente y norte de África, muestran que la integración de microalgas en sistemas hidropónicos contribuye de manera consistente a estabilizar la fisiología vegetal bajo condiciones de estrés. En lechuga hidropónica sometida a salinidad, los preparados microalgales y extractos de *C. vulgaris* permiten mantener contenidos elevados de clorofila y proteínas, al tiempo que reducen indicadores de daño oxidativo, como la peroxidación lipídica, y favorecen un ajuste iónico caracterizado por mayor retención de K⁺ y exclusión de Na⁺, mecanismo clave en ambientes con restricción hídrica o uso de aguas salinas.

En condiciones de estrés simulado, los patrones observados son coherentes con los reportados en campo, aunque con una mayor resolución mecánica. En pepino y otros modelos hortícolas, *Scenedesmus obliquus* muestra una capacidad notable para recuperar el aparato fotosintético tras exposiciones severas a salinidad y alcalinidad, con incrementos de clorofila superiores al 40% y reducciones significativas de MDA, lo que indica protección de membranas celulares. De manera complementaria, estudios de déficit hídrico evidencian que extractos y metabolitos solubles de *Chlorella* inducen respuestas fisiológicas como el cierre estomático y la reducción de la pérdida de agua, mecanismos que explican los aumentos de crecimiento y pigmentos reportados incluso bajo restricciones severas de disponibilidad hídrica.

De manera global, los resultados de la revisión evidencian patrones consistentes: (i) las microalgas, en particular *C. vulgaris*, *Scenedesmus* spp. y *A. platensis*, mejoran variables fisiológicas clave como el contenido de clorofila, antioxidantes, absorción nutrimental que sostienen el rendimiento en hidroponía; (ii) estos efectos son especialmente relevantes bajo estrés hídrico y salino, condiciones características de zonas áridas y semiáridas; (iii) la forma de aplicación (extracto, biomasa procesada, metabolitos solubles) resulta determinante para evitar competencia y maximizar beneficios. En conjunto, existe una convergencia clara entre estudios en cuanto al rol bioestimulante de las microalgas, aunque persisten inconsistencias relacionadas con

dosis, especies y modos de integración en sistemas cerrados.

Finalmente, se identifican vacíos de investigación relevantes: escasez de ensayos de largo plazo en regiones áridas reales, limitada estandarización de dosis y formulaciones microalgales, y poca información comparativa entre sistemas hidropónicos (NFT, DWC, aeropónico) bajo estrés. Estos vacíos justifican la necesidad de futuras investigaciones orientadas a optimizar la aplicación de bioinsumos microalgales en agricultura hidropónica sostenible, cerrando la brecha entre evidencia experimental y adopción tecnológica en territorios con alta vulnerabilidad hídrica.

4. Conclusiones

- La aplicación de microalgas en sistemas hortícolas hidropónicos es técnicamente viable y mejora el desempeño del cultivo; se observan incrementos en biomasa, área foliar y estabilidad del rendimiento, así como mejoras en clorofila, actividad antioxidante y absorción de nutrientes, especialmente bajo estrés ambiental.
- *C. vulgaris* presenta mayor respaldo empírico y destaca por regular el metabolismo carbono-nitrógeno, el ajuste osmótico y la eficiencia fotosintética; *Scenedesmus spp.* contribuye a la protección fotosintética, reducción del daño oxidativo y desarrollo radical, mientras *A. platensis* actúa mediante compuestos como ficocianina y polisacáridos que favorecen el crecimiento y la eficiencia fisiológica.

- En condiciones de estrés hídrico y salino, las microalgas aportan principalmente a la mitigación de pérdidas productivas y al mantenimiento funcional del cultivo más que al aumento absoluto del rendimiento, consolidándose como una estrategia clave para fortalecer la resiliencia y sostenibilidad de los sistemas hidropónicos.

5. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

6. Declaración de contribución de los autores

Todos autores contribuyeron significativamente en la elaboración del artículo.

7. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

8. Referencias Bibliográficas

- Alghamdi, S. A., Alharby, H. F., Abdelfattah, M. A., Mohamed, I. A. A., Hakeem, K. R., Rady, M. M., & Shaaban, A. (2023). *Spirulina platensis*-inoculated humified compost boosts rhizosphere soil hydro-physico-chemical properties and *Atriplex nummularia* forage yield and quality in an arid saline calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2215–2236. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01174-x>
- Alling, T., Funk, C., & Gentili, F. G. (2023). Nordic microalgae produce

- biostimulant for the germination of tomato and barley seeds. *Scientific Reports*, 13, 3509. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30707-8>
- Alvarenga, P., Martins, M., Ribeiro, H., Mota, M., Guerra, I., Cardoso, H., & Laranjeira Silva, J. L. (2023). Evaluation of the fertilizer potential of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* grown in agricultural drainage water from maize fields. *The Science of the Total Environment*, 861(160670), 160670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160670>
- Álvarez-Gil, M., Blanco-Vieites, M., Suárez-Montes, D., Casado-Bañares, V., Delgado-Ramallo, J. F., & Rodríguez, E. (2023). Revolutionizing agriculture: Leveraging hydroponic greenhouse wastewater for sustainable microalgae-based biostimulant production. *Sustainability*, 15(19), 14398. <https://doi.org/10.3390/su151914398>
- Ammaturo, C., Pacheco, D., Cotas, J., Formisano, L., Ciriello, M., Pereira, L., & Bahcevandziev, K. (2023). Use of *Chlorella vulgaris* and *Ulva lactuca* as biostimulant on lettuce. *Applied Sciences*, 13(16), 9046. <https://doi.org/10.3390/app13169046>
- Fadia, A., Ibtissam, L., Anass, W., Laila, R., Moustapha, A., & Imane, W. (2023). Comparison of the effect of two categories of polysaccharides on tomato growth: Effect on morphological, histological and biochemical plant growth traits. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02948-7>
- Barreno Avila, E. M., Córdova Suárez, M. A., Vargas López, J. H., & Calderón Valdiviezo, M. D. (2020). Water hyacinth (*Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms) and water duckweed. (*Lemna* Spp.) to reduce the hardness of irrigation water. *Conciencia Digital*, 3(1.1), 133-146. <https://doi.org/10.33262/concienciaadigital.v3i1.1.1136>
- Barros, R., Raposo, S., Morais, E. G., Rodrigues, B., Afonso, V., Gonçalves, P., Marques, J., Cerqueira, P. R., Varela, J., Teixeira, M. R., & Barreira, L. (2022). Biogas production from microalgal biomass produced in the tertiary treatment of urban wastewater: Assessment of seasonal variations. *Energies*, 15(15), 5713. <https://doi.org/10.3390/en15155713>
- Bauenova, M. O., Sarsekeyeva, F. K., Sadvakasova, A. K., Kossalbayev, B. D., Mammadov, R., Token, A. I., Balouch, H., Pashkovskiy, P., Leong, Y. K., Chang, J.-S., & Allakhverdiev, S. I. (2024). Assessing the efficacy of cyanobacterial strains as *Oryza*

- sativa growth biostimulants in saline environments. *Plants*, 13(17), 2504. <https://doi.org/10.3390/plants13172504>
- Bonatelli, M. L., Lacerda-Júnior, G. V., dos Reis Junior, F. B., Fernandes-Júnior, P. I., Melo, I. S., & Quecine, M. C. (2021). Beneficial plant-associated microorganisms from semiarid regions and seasonally dry environments: A review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 553223. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.553223>
- Briones García, J. I., Mejía Reinoso, T. J., & Briones García, H. D. (2021). Evaluation of the chemical fertility of the soil in an initial productive Theobroma cacao system of the “Hermanos Briones” farm, Portoviejo - Ecuador. *Conciencia Digital*, 4(3.1), 227-237. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.1.1825>
- Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., Bezrukov, A., Zaworotko, M., & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 369(133214), 133214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214>
- Castro, I. M. P., Rosa, A., Borges, A., Cunha, F., & Passos, F. (2024). The effects of microalgae use as a biofertilizer on soil and plant before and after its anaerobic (co-)digestion with food waste. *Science of the Total Environment*, 934(173301), 173301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173301>
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). Effects of extraction methods on the plant biostimulant activity of the soil microalga *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology*, 36(6), 3301–3314. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03328-5>
- Chaudhuri, R., & Balasubramanian, P. (2024). Enhancing nutrient removal from hydroponic effluent with simultaneous improvements in biomass productivity and lipid content under mixotrophic cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 37, 957-971. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03425-5>
- Vieira, J., Saque, M., Gama, F., Viana, C., Coelho, L., Rodrigues, M. H., Varela, J., Pereira, H., Palencia, P., Reis, M., Pestana, M., & Correia, P. J. (2025). Evaluation of *Chlorella vulgaris* application as a biostimulant for lettuce growth in soilless culture. *Journal of Applied Phycology*, 37(6), 4219–4230.

- <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03660-4>
Cruz Romero, C. E., Morán Castro, C. E., Gómez Bermeo, A. A., Cruz Miranda, J. K., & Vargas Guillén, P. I. (2024). Comparative analysis of beneficial fungi in the management of moniliasis (*Moniliophthora roreri*) in cocoa (*Theobroma cacao* L.) at in vitro level. *Alfa Publicaciones*, 6(3.2), 6–21.
<https://doi.org/10.33262/ap.v6i3.2.529>
- Dagnaisser, L. S., dos Santos, M. G. B., Santa Rita, A. V., Chaves Cardoso, J., de Carvalho, D. F., & de Mendonça, H. V. (2022). Microalgae as bio-fertilizer: A new strategy for advancing modern agriculture, wastewater bioremediation, and atmospheric carbon mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233, 477.
<https://doi.org/10.1007/s11270-022-05917-x>
- Dasgan, H. Y., Yilmaz, D., Zikaria, K., Ikiz, B., & Gruda, N. S. (2023). Enhancing the yield, quality, and antioxidant content of lettuce through innovative and eco-friendly biofertilizer practices in hydroponics. *Horticulturae*, 9(12), 1274.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9121274>
- Francioso, O., Schiavon, M., Nardi, S., Castellani, D., Ferrari, E., Estrada, M. T. R., Della Lucia, M. C., Zuffi, V., & Ertani, A. (2024). Mitigation of salt stress in *Lactuca sativa* L. var. Gentile Rossa using microalgae as priming agents. *Plants*, 13(23), 3311.
<https://doi.org/10.3390/plants13233311>
- Gharib, F. A., Osama, K., Sattar, A. M., & Ahmed, E. Z. (2024). Impact of *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis salina*, and *Arthrospira platensis* as biostimulants on common bean plant growth, yield, and antioxidant capacity. *Scientific Reports*, 14(1), 1398.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-50040-4>
- Gitau, M. M., Farkas, A., Ördög, V., & Maróti, G. (2022). Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Cleaner Production*, 364(132689), 132689.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132689>
- González-Pérez, B. K., Rivas-Castillo, A. M., Valdez-Calderón, A., & Gayosso-Morales, M. A. (2021). Microalgae as biostimulants: A new approach in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(1), 4.
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03192-2>
- Guapi Auquilla, A. P., Robayo Carrillo, K. P., Salazar Castañeda, E. P., & Vivar Arrieta, M. A. (2024). Cultivation strategies:

- comparative analysis of lettuce typologies in hydroponic systems. *Conciencia Digital*, 7(3.1), 68-82. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.1.3141>
- Hegazy, A., Farid, M., Subiantoro, A., & Norris, S. (2022). Sustainable cooling strategies to minimize water consumption in greenhouse in hot arid region. *Agricultural Water Management*, 274(107960), 107960. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107960>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Kapoor, R. V., Wood, E. E., & Llewellyn, C. A. (2021). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49(107754), 107754. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107754>
- Karimzadeh, S., Daccache, A., Rulli, M. C., & Ahamed, M. S. (2025). Global water–nutrient–salinity–energy nexus in lettuce production: From open-field irrigation to closed-loop hydroponics in greenhouses. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101935. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101935>
- Kusvuran, S. (2021). Microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijerinck) alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidative defense system. *Horticulture Plant Journal*, 7(3), 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.03.007>
- La Bella, E., Baglieri, A., Rovetto, E. I., Stevanato, P., & Puglisi, I. (2021). Foliar spray application of *Chlorella vulgaris* extract: Effect on the growth of lettuce seedlings. *Agronomy*, 11(2), 308. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020308>
- Li, X., Lu, Y., Li, N., Wang, Y., Yu, R., Zhu, G., & Zeng, R. J. (2022). Mixotrophic cultivation of microalgae using biogas as the substrate. *Environmental Science & Technology*, 56(6), 3669–3677. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06831>
- Liu, Z., Dong, Y., Jin, X., Liu, Y., Yue, Z., & Li, W. (2025). Repair effects of *Scenedesmus obliquus* on cucumber seedlings under saline–alkali stress. *Agronomy*, 15(6), 1468. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061468>
- Loroña Alarcón, D. E., Campoverde Santos, D. K., & Moscoso Gómez,

- M. E. (2020). Mathematical model for the productive and economic development of agroecosystems of the community El Guzo, Penipe canton. *Visionario Digital*, 4(3), 170-180.
<https://doi.org/10.33262/visionario-digital.v4i3.1341>
- Marka, S., Zografaki, M.-E., Karavidas, I., Ntanasi, T., Kalloniati, C., Ntzouvaras, A., Skliros, D., Tzovenis, I., Ntatsi, G., Moschopoulou, G., Kintzios, S., & Fletmetakis, E. (2026). Metabolomic and physiological insights into the biostimulant activity of *Chlorella vulgaris* extract in hydroponic lettuce under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 355(114560), 114560.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114560>
- Memeli, İ., Tüzel, Y., Uysal, Ö., Durdu, T., Uysal, F. Ö., Harouna, O. S., Ekinci, K., & Gruda, N. S. (2025). Microalgae enhanced plant growth and yield, and improved leaf color in soilless lettuce. *Scientific Reports*, 15(1), 40313.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-24004-9>
- Moon, J., Park, Y. J., Choi, Y. B., Truong, T. Q., Huynh, P. K., Kim, Y. B., & Kim, S. M. (2024). Physiological effects and mechanisms of *Chlorella vulgaris* as a biostimulant on the growth and drought tolerance of *Arabidopsis thaliana*. *Plants*, 13(21), 3012.
<https://doi.org/10.3390/plants13213012>
- Morillas-España, A., Pérez-Crespo, R., Villaró-Cos, S., Rodríguez-Chikri, L., & Lafarga, T. (2024). Integrating microalgae-based wastewater treatment, biostimulant production, and hydroponic cultivation: a sustainable approach to water management and crop production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1364490.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1364490>
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. E.-K. B. (2024a). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(17), 21059–21068.
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-04533-x>
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. E.-K. B. (2024b). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(17), 21181–21191.
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-04460-x>
- Nejatian, A., Niane, A. A., Makkawi, M., Al-Sham'aa, K., Shamsi, S. A. R. A., Naqbi, T. S. A. M. A.,

- Ibrahim, H. Y. H., & Juma, J. E. (2025). Solar-powered ro-hydroponic net house: a scalable model for water-efficient tomato production in arid regions. *Sustainability*, *17*(24), 11298. <https://doi.org/10.3390/su172411298>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *372*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pathom-Aree, W., Sensupa, S., Wichaphian, A., Sriket, N., Kitwetch, B., Pekkoh, J., Sattayawat, P., Lomakool, S., Chromkaew, Y., & Srinuanpan, S. (2024). An innovative co-cultivation of microalgae and actinomycete-inoculated lettuce in a hydroponic deep-water culture system for the sustainable development of a food-agriculture-energy nexus. *Horticulturae*, *10*(1), 70. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010070>
- Puglisi, I., La Bella, E., Rovetto, E. I., Stevanato, P., Fascella, G., & Baglieri, A. (2022). Morpho-biometric and biochemical responses in lettuce seedlings treated by different application methods of *Chlorella vulgaris* extract: Foliar spray or root drench? *Journal of Applied Phycology*, *34*(2), 889–901. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02671-1>
- Regmi, A., Rueda-Kunz, D., Liu, H., Trevino, J., Kathi, S., & Simpson, C. (2024). Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems. *Technology in Horticulture*, *4*(1). <https://doi.org/10.48130/tihort-0024-0002>
- Renganathan, P., Rueda Puente, E. O., Sukhanova, N. V., & Gaysina, L. A. (2024). Hydroponics with microalgae and cyanobacteria: Emerging trends and opportunities in modern agriculture. *BioTech*, *13*(3), 27. <https://doi.org/10.3390/biotech13030027>
- Salazar, J., Santana-Sánchez, A., Näkkilä, J., Sirin, S., & Allahverdiyeva, Y. (2023). Complete N and P removal from hydroponic greenhouse wastewater by *Tetrademus obliquus*: A strategy for algal bioremediation and cultivation in Nordic countries. *Algal Research*, *70*(102988), 102988. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102988>

- Salazar, J., Valev, D., Näkkilä, J., Tyystjärvi, E., Sirin, S., & Allahverdiyeva, Y. (2021). Nutrient removal from hydroponic effluent by Nordic microalgae: From screening to a greenhouse photobioreactor operation. *Algal Research*, 55(102247), 102247. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102247>
- Senousy, H. H., Alhaj Hamoud, Y., Abu-Elsaoud, A. M., Mahmoud Al Zoubi, O., Abdelbaky, N. F., Ziaur-Rehman, M., Usman, M., & Soliman, M. H. (2023). Algal biostimulants enhance salt tolerance in common bean: Dissecting morphological, physiological, and genetic mechanisms. *Plants*, 12(21), 3714. <https://doi.org/10.3390/plants12213714>
- Toscano, S., Romano, D., Massa, D., Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2018). Biostimulant applications in low input horticultural cultivation systems. *Italus Hortus*, 25(2), 27–36. https://www.soihs.it/ItalusHortus/revue/35_anno_25_2018_numero_2/biostimulant_applications_in_low_input_hortic.aspx
- Touzout, N., Ainas, M., Babaali, M., Moussa, H., Mihoub, A., Ahmad, I., Jamal, A., Danish, S., Ahmad, R., Dewir, Y. H., & Székely, Á. (2025). Potential effect of non-nitrogen fixing cyanobacteria *Spirulina platensis* on growth promotion of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Scientific Reports*, 15(1), 29029. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14567-y>
- Tsafaras, I., Campen, J. B., Stanghellini, C., de Zwart, H. F., Voogt, W., Scheffers, K., Harbi, A. A., & Assaf, K. A. (2021). Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions. *Agricultural Water Management*, 250(106807), 106807. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106807>
- Özer Uyar, G. E., & Mısmıl, N. (2022). Symbiotic association of microalgae and plants in a deep water culture system. *PeerJ*, 10, e14536. <https://doi.org/10.7717/peerj.14536>
- Valero, N., Ustates, Y., & Pantoja-Guerra, M. (2023). Biostimulant activity of humic acids derived from goat manure vermicompost and lignite in relation to their structure and interaction with a PGPR strain under semiarid conditions. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(2), e15956. <https://doi.org/10.17584/rcch.2023.v17i2.15956>
- Varia, J., Kamaleson, C., & Lerer, L. (2022). Biostimulation with phycocyanin-rich *Spirulina* extract in hydroponic vertical farming. *Scientia Horticulturae*, 299(111042), 111042. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111042>

- Vildanova, G. I., Allaguvatova, R. Z., Kunsbaeva, D. F., Sukhanova, N. V., & Gaysina, L. A. (2023). Application of *Chlorella vulgaris* Beijerinck as a biostimulant for growing cucumber seedlings in hydroponics. *BioTech*, 12(2), 42. <https://doi.org/10.3390/biotech12020042>
- Zhang, Z., Xu, M., Fan, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of the Total Environment*, 912(169424), 169424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169424>
- Žunić, V., Jafari, T. H., Grabić, J., Đurić, S., & Stamenov, D. (2022). Hydroponic systems: Exploring the balance between co-cultivation of *Chlorella vulgaris* and Swiss chard (*Beta vulgaris* L. subsp. *cicla*). *Journal of Applied Phycology*, 34(2), 903–913. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02673-z>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

