



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



Efecto bioestimulante de *Neochloris vigensis* Archibald sobre el crecimiento de *Solanum lycopersicum* L.

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

JOSÉ FRANCISCO PRECIADO GUZMÁN

Bajo la supervisión de:

DRA. MARÍA DEL ROSARIO GARCÍA MATEOS

Chapingo, México a mayo de 2026



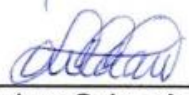
La presente tesis titulada “**Efecto bioestimulante de *Neochloris vigensis* Archibald sobre el crecimiento de *Solanum lycopersicum* L.**” fue realizada por el C. José Francisco Preciado Guzmán, dirigida por la Dra. María del Rosario García Mateos, codirigida por el Dr. Joel Pineda Pineda y asesoría del Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Ph. D. Jaime Sahagún Castellanos y la M.C. Lidia Velasco Velasco, misma que fue aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Directora: 
Dra. María del Rosario García Mateos

Codirector: 
Dr. Joel Pineda Pineda

Asesor: 
Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez

Asesor: 
Ph. D. Jaime Sahagún Castellanos

Asesor: 
M. C. Lidia Velasco Velasco

Chapingo, México. Mayo 2026

DEDICATORIA

*A mis padres y hermanos,
por brindarme su apoyo constante
y por alentarme a continuar
aún en los momentos difíciles*

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada para continuar con mi formación profesional y académica.

Al Departamento de Suelos y al Departamento de Fitotecnia por brindarme su apoyo durante la realización del estudio.

A mi directora de tesis, el Dra. María del Rosario García Mateos, codirector Dr. Joel Pineda Pineda, y a mis asesores, el Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Ph. D. Jaime Sahagún Castellanos y la M. C. Lidia Velasco Velasco, por su apoyo y acompañamiento, quienes con sus amplios conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A IBQ. Ana Paloma García Razo por ayudarme a despertar mi interés en las microalgas

A la Dra. Azucena Chávez Collantes Instituto Nacional de Innovación Agraria de Perú por facilitarme su Manual para la producción de biofertilizantes a base de microalgas.

A Lesly Belén Valencia Gámez, Marla Juquila López Sánchez, Alan Rodolfo Hernández Pérez, Ariadna Goreti López Méndez, Erika Alejandra Cintora Martínez, Juan Ramos, Alejandra López Carmona, Gina Kelly Méndez Castillo, Roxana Montes Morales, Valente Meza Calderón, Iracema Isabela Luna Reyes, Luis Alberto Licona Monroy, Esmeralda Flores García, Marco Antonio Rubio Esquivel, Ángel Pacheco Gabriel, David Martínez Salazar, Laura Hernández Rodríguez, Diana Ximenza Hernández Arellano, Flor Marcela Hernández García, Maria Ramirez Melchor y Diego Licona Monroy por ayudarme en el establecimiento y toma de datos del experimento en la fase de invernadero.

A los profesores Dr. Joel Pineda Pineda por su constante acompañamiento en el desarrollo del experimento y al M.C. Raul Zapata Rosales por su apoyo con material para establecer los primeros cultivos de microalgas a gran escala. Al personal técnico de la UACH: María Hayde Téllez Sánchez y Jorge Luis Sánchez Galicia por el apoyo en el establecimiento y análisis de laboratorio.

A mis amigos, Jennifer Ruíz Miguel, Uriel Pérez Hernández, Alberto Luna, Alma Lizbeth Tagle, Sheyla Yaeli Ruiz Jaimez, Lesly Belén Valencia Gámez, Juquila López Sánchez, Alan Rodolfo Hernández, Fernando Cruz Lázaro y Héctor Hugo Fuentes Franco por su invaluable amistad.

A mis compañeros del posgrado que formaron parte de esta experiencia y que de alguna manera siempre expresaron su apoyo.

Muy en especial a mis padres y hermanos por apoyarme siempre de todas las maneras posibles en todo lo que me he propuesto hacer y alentarme a seguir adelante.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: José Francisco Preciado Guzmán

Fecha de Nacimiento: 1 de mayo de 1995

CURP: PEGF950501HJCRZR09

Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos



Datos académicos

Bachillerato: Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniería Agronómica Especialista en Suelos. Universidad Autónoma Chapingo

Cédula profesional: 13753258

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	9
LISTA DE FIGURAS	12
RESUMEN GENERAL	14
GENERAL ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO 1. Introducción general	16
1.1 Literatura citada.....	18
CAPÍTULO 2. Revisión de literatura	21
2.1 Estrategias en la promoción del crecimiento vegetal	21
2.2 Bioestimulantes	21
Definición de bioestimulante	21
Tipo de bioestimulantes y su clasificación	22
2.3 Generalidades de las algas	23
Macroalgas	24
Microalgas.....	24
2.4 Usos y aplicaciones de las microalgas	24
Acuicultura	24
Agricultura.....	25
Biomedicina y farmacología	26
Alimentación humana y animal	26
2.5 Cultivo de microalgas	26
Fase de latencia.....	26
Fase exponencial	26
Fase de crecimiento lineal	27
Fase estacionaria.....	27
Fase de muerte.....	27
2.6 Parámetros que influyen en el crecimiento de las microalgas.....	27
Luz	28
pH	28
Salinidad	28
Nutrientes.....	28
Nitrógeno	29

Fósforo.....	29
2.7 Aplicación de microalgas como fitoestimulantes y bioestimulantes	29
2.8 Sustancias bioactivas de cultivos de microalgas y cianobacterias	30
2.9 <i>Neochloris vigensis</i> Archibald	31
Taxonomía de <i>Neochloris vigensis</i>	31
2.10 Cultivo de tomate	32
Importancia económica y productiva.....	32
Etapas fenológicas del tomate	32
Requerimientos nutricionales y ambientales.....	33
Uso de bioestimulantes en tomate	33
2.11 Literatura citada.....	33
CAPÍTULO 3. Efecto de la concentración de inóculo sobre el crecimiento y remoción de nutrimentos por <i>Neochloris vigensis</i> Archibald en condiciones fotoautotróficas	39
Resumen.....	39
Introducción	40
Materiales y métodos	42
Resultados	44
Discusión	49
Conclusiones	53
Literatura citada	53
CAPÍTULO 4. Efecto bioestimulante de la concentración de <i>Neochloris vigensis</i> Archibald sobre el crecimiento y la dinámica nutrimental en <i>Solanum lycopersicum</i> L. 60	
Resumen.....	60
Introducción	61
Materiales y métodos	62
Resultados y discusión	66
Conclusiones	96
Literatura citada	97
CAPÍTULO 5. Aplicación de <i>Neochloris vigensis</i> Archibald sobre el crecimiento, calidad del fruto y rendimiento de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	101
Resumen.....	101
Introducción	102
Materiales y métodos	103

Resultados y discusión	105
Conclusiones	113
Literatura citada	113

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros asociados con el crecimiento de <i>Neochloris vigensis</i> a los 30 d después de la inoculación.	46
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de la biomasa producida y macronutrientes removidos en el medio de cultivo por <i>Neochloris vigensis</i>	47
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de los micronutrientes removidos en el medio de cultivo por <i>Neochloris vigensis</i>	47
Cuadro 4. Comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) de la biomasa producida (g L^{-1}) y remoción (%) de macronutrientes con variaciones en la concentración de inóculo (g L^{-1}) de <i>Neochloris vigensis</i>	47
Cuadro 5. Comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) del porcentaje de remoción de micronutrientes con diferentes concentraciones de inóculo (g L^{-1}) de <i>Neochloris vigensis</i>	48
Cuadro 6. Tratamientos evaluados en función del genotipo y la concentración de <i>Neochloris vigensis</i>	63
Cuadro 7. Cuadrados medios de los caracteres evaluados asociados al crecimiento, sistema radical y pigmentos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	69
Cuadro 8. Cuadrados medios de la concentración de los nutrientes en los diferentes órganos en <i>Solanum lycopersicum</i> L.	71
Cuadro 9. Cuadrados medios de las eficiencias nutritivas en <i>Solanum lycopersicum</i> L. PB: balance parcial de nutrientes; EI: eficiencia de utilización interna.	74
Cuadro 10. Perfil de aminoácidos de <i>Neochloris vigensis</i>	75
Cuadro 11. Comparación de medias (Tukey) de la concentración de <i>Neochloris vigensis</i> (g L^{-1}) sobre los caracteres asociados al crecimiento, sistema radical y pigmentos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	77
Cuadro 12. Comparación de medias de los nutrientes por efecto de la concentración de <i>Neochloris vigensis</i> (g L^{-1}) en los diferentes órganos en <i>Solanum lycopersicum</i> L. .	79
Cuadro 13. Comparación de medias de los nutrientes extraídos por <i>Solanum lycopersicum</i> L. (mg planta^{-1}) por efecto de la concentración (CON) de <i>Neochloris vigensis</i>	80

Cuadro 14. Comparación de medias de las eficiencias obtenidas en <i>Solanum lycopersicum</i> L. por efecto de la concentración (CON) de <i>Neochloris vigensis</i>	81
Cuadro 15. Comparación de medias de la interacción concentración x genotipo de los caracteres asociados al crecimiento en genotipos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	83
Cuadro 16. Comparación de medias de la interacción concentración x genotipo sobre los caracteres asociados al sistema radical y pigmentos en genotipos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	84
Cuadro 17. Comparación de medias de los nutrimentos en tallo de <i>Solanum lycopersicum</i> L.por efecto de la interacción concentración x genotipo.	85
Cuadro 18. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en hoja <i>Solanum lycopersicum</i> L. por efecto de la interacción concentración x genotipo.	87
Cuadro 19. Comparación de medias de los nutrimentos extraídos por <i>Solanum lycopersicum</i> L. (mg planta ⁻¹) por efecto de la interacción concentración x genotipo....	88
Cuadro 20. Comparación de medias del balance parcial (PB) de nutrimentos por <i>Solanum lycopersicum</i> L. (%) de la interacción concentración x genotipo.	89
Cuadro 21. Comparación de medias de la eficiencia de utilización interna (EI) de macronutrimentos en <i>Solanum lycopersicum</i> L. de la interacción concentración x genotipo.....	90
Cuadro 22. Comparación de medias de la eficiencia de utilización interna (EI) de micronutrimentos en <i>Solanum lycopersicum</i> L. de la interacción concentración x genotipo.	91
Cuadro 23. Combinaciones utilizadas en el experimento	104
Cuadro 24. Parámetros del modelo exponencial al rendimiento acumulado de <i>Solanum lycopersicum</i> L. en función de la combinación de aplicación de <i>Neochloris vigensis</i> ..	106
Cuadro 25. Parámetros del modelo exponencial ajustado al rendimiento acumulado de genotipos de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	107
Cuadro 26. Cuadrados medios de la altura al primer racimo (AR1), altura al quinto racimo (AR%), altura de la planta (AP), longitud de entrenudos (LE) y distancia entre racimos (DR) en <i>Solanum lycopersicum</i> L.	107
Cuadro 27. Cuadrados medios del análisis de varianza de las características del fruto y variables de rendimiento de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	108

Cuadro 28. Comparaciones de medias del peso del fruto (PF), rendimiento (REN) y número de frutos (NF) de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	109
Cuadro 29. Comparación de medias de la altura al primer racimo (AR1), altura al quinto racimo (AR5), longitud de entrenudos (LE) y distancia entre racimos (DR) de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	111
Cuadro 30. Comparación de medias de las características del fruto y variables de rendimiento en función del genotipo de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	112
Cuadro 31. Contrastes del método de aplicación (MA) de la suspensión microalgal sobre las características fisicoquímicas del fruto y variables de rendimiento de <i>Solanum lycopersicum</i> L., evaluado mediante contrastes ($p \leq 0.05$).	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación general de las algas basada en sus principales grupos taxonómicos. Adaptado de Barsanti y Gualtieri (2014).....	24
Figura 2. Curva de crecimiento de un cultivo de microalgas (adaptado de Fogg, 1987)	27
Figura 3. Amplificación del fragmento correspondiente al espacio transcrito interno del DNA ribosomal de 671 pares de bases (bp); 100 pb: marcador de peso molecular 100 pb: C-: control negativo; 1: muestra del amplicón purificado.	44
Figura 4. Crecimiento de <i>Neochloris vigensis</i> mediante densidad óptica (OD) a 750 nm con variaciones en la concentración de inóculo (g L^{-1}) a los 30 días después de la inoculación (DDI).	45
Figura 5. Velocidad de crecimiento (c) de <i>Neochloris vigensis</i> con variaciones en la concentración de inóculo (g L^{-1}) a los 30 d después de la inoculación (DDI).	46
Figura 6. Modelos de regresión de los porcentajes de remoción de nutrimentos ante variaciones en la concentración de <i>Neochloris vigensis</i> a) calcio; b) magnesio; c) potasio; d) nitratos; e) fosfatos; f) hierro; g) cobre; h) zinc; i) manganeso; j) boro. Los coeficientes de todos los modelos de regresión presentados son estadísticamente diferentes de cero ($p \leq 0.05$).	49
Figura 7. Crecimiento en altura de planta (AP) de <i>Solanum lycopersicum</i> L. en respuesta a diferentes concentraciones de suspensión de <i>Neochloris vigensis</i>	66
Figura 8. Tasas de crecimiento (c) en altura de planta (AP) durante el crecimiento y desarrollo de <i>Solanum lycopersicum</i> L. con y sin suspensión de <i>Neochloris vigensis</i> . Barras verticales corresponden al intervalo de confianza (95 %).	67
Figura 9. Diferencias en altura de <i>Solanum lycopersicum</i> L. con diferentes suspensiones de <i>Neochloris vigensis</i> a los 25 DDT: a) 0.00 g L^{-1} ; b) 0.10 g L^{-1} ; c) 0.21 g L^{-1} ; d) 0.42 g L^{-1}	68
Figura 10. Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre variables de crecimiento, sistema radical, pigmentos, nutrimentos en raíz, e índices de balance parcial y eficiencias de utilización interna en <i>Solanum lycopersicum</i> L. por efecto de la concentración de <i>Neochloris vigensis</i>	93

Figura 11. Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de crecimiento, sistema radical, pigmentos, nutrimentos en raíz, balance parcial de nutrimentos y eficiencia de utilización interna en genotipos de <i>Solanum lycopersicum</i> L. tratadas con diferentes concentraciones de <i>Neochloris vigensis</i> . CP1 y CP2 explican el 48.9 y 32.4 % de la variación total, respectivamente (acumulada 81.3 %). 1: T1; 2: T2; 3: T3; 4: T4; 5: T5; 6: T6; 7: T7; 8: T8; 9: T9; 10: T10; 11: T11; 12: T12.	96
Figura 12. Rendimiento acumulado (RENa) de <i>Solanum lycopersicum</i> L. tratadas con diferentes combinaciones de aplicación de <i>Neochloris vigensis</i> (a); y parámetro <i>c</i> (tasa de crecimiento relativa del rendimiento) e intervalos de confianza al 95 % para cada combinación (b).	106
Figura 13. Rendimiento acumulado (RENa) de genotipos de <i>Solanum lycopersicum</i> L. (a). Parámetro <i>c</i> (tasa relativa de crecimiento del rendimiento) e intervalos de confianza al 95 % para cada genotipo (b).....	107
Figura 14. Peso del fruto (PF), rendimiento (REN) y número de frutos (NF) por efecto de la aplicación de <i>Neochloris vigensis</i> en <i>Solanum lycopersicum</i> L. T = testigo; F = aplicación foliar; D = aplicación en drench al sustrato. Los valores entre paréntesis indican la concentración (g L ⁻¹). Barras representan la desviación estándar. Las barras con letras iguales en cada carácter evaluado no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$)......	110

RESUMEN GENERAL

Efecto bioestimulante de *Neochloris vigensis* Archibald sobre el crecimiento de *Solanum lycopersicum* L.

Las microalgas han sido ampliamente estudiadas por su potencial en la remoción de nutrimentos y como bioestimulantes en la agricultura. En este contexto, *Neochloris vigensis* representa una alternativa con aplicaciones, tanto en el tratamiento de efluentes, como en la producción vegetal. Los objetivos del presente estudio fueron: 1) evaluar el efecto de la concentración de inóculo de *N. vigensis* sobre el crecimiento, producción de biomasa y remoción de nutrimentos en condiciones fotoautotróficas, 2) determinar su efecto sobre el crecimiento, la dinámica nutrimental y la eficiencia de uso de nutrimentos en genotipos de *Solanum lycopersicum* L. en balsa flotante y 3) evaluar su impacto sobre el rendimiento y la calidad del fruto de *Solanum lycopersicum* en condiciones hidropónicas. Se evaluó la concentración de inóculo, crecimiento microalgal, biomasa, así como, la remoción de nutrimentos. En sistemas hidropónicos se evaluó el crecimiento de la planta, acumulación nutrimental, balance parcial y eficiencia de utilización interna, rendimiento y calidad del fruto con diferentes métodos de aplicación y concentraciones de suspensión microalgal. Los resultados mostraron que la concentración de 0.43 g L⁻¹ maximizó la producción de biomasa, con el siguiente orden en la remoción de nutrimentos: Mn > Mg > Fe > Cu > NO₃⁻ > Zn > Ca > K > H₂PO₄⁻ > B. En el sistema de producción en balsa flotante, la concentración de 0.42 g L⁻¹ incrementó la biomasa, la acumulación nutrimental y el balance parcial, proporción de raíces muy finas e incremento en la eficiencia de utilización interna de Zn, Mn y B ($p \leq 0.05$). La aplicación de *N. vigensis* incrementó el peso del fruto, el número de frutos, los sólidos solubles totales, la firmeza y el rendimiento, sin afectar los caracteres de crecimiento, ni presentar diferencias entre métodos de aplicación ("drench" y foliar).

Palabras clave: Biomasa, dinámica nutrimental, remoción de nutrimentos, tomate, rendimiento,

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: José Francisco Preciado Guzmán

Dirección: Dra. María del Rosario García Mateos

GENERAL ABSTRACT

Biostimulant effect of *Neochloris vigensis* Archibald on the growth of *Solanum lycopersicum* L.

Microalgae have been extensively studied for their potential in nutrient removal and as biostimulants in agriculture. In this context, *Neochloris vigensis* represents an alternative with applications in both wastewater treatment and plant production. The objectives of this study were: (1) to evaluate the effect of inoculum concentration of *N. vigensis* on growth, biomass production, and nutrient removal under photoautotrophic conditions; (2) to determine its effect on growth, nutrient dynamics, and nutrient use efficiency in *Solanum lycopersicum* L. genotypes grown in floating raft systems; and (3) to assess its impact on yield and fruit quality of *Solanum lycopersicum* under hydroponic conditions. Inoculum concentration, microalgal growth, biomass production, and nutrient removal were evaluated. In hydroponic systems, plant growth, nutrient accumulation, partial nutrient balance, internal nutrient use efficiency, yield, and fruit quality were assessed under different application methods and microalgal suspension concentrations. The results showed that a concentration of 0.43 g L⁻¹ maximized biomass production, with the following order of nutrient removal: Mn > Mg > NO₃⁻ > Zn > Ca > K > H₂PO₄⁻ > B. In the floating raft production system, a concentration of 0.42 g L⁻¹ increased biomass, nutrient accumulation, and partial nutrient balance, as well as, the proportion of very fine roots, and improved the internal utilization efficiency of Zn, Mn, and B ($p \leq 0.05$). The application of *N. vigensis* increased fruit weight, fruit number, total soluble solids, firmness, and yield, without affecting growth traits or showing differences between application methods (drench and foliar).

Key words: Biomass, nutrient dynamic, nutrient removal, tomato, yield.

Thesis of Master of Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: José Francisco Preciado Guzmán

Advisor: Dra. María del Rosario García Mateos

CAPÍTULO 1. Introducción general

Para abordar la problemática de la agricultura en las próximas décadas se requerirán técnicas novedosas para mejorar la productividad de los cultivos y, al mismo tiempo, que promuevan la preservación de los recursos naturales como el agua y el suelo (Rijsberman, 2006), contribuyan a enfrentar los desafíos del cambio climático y garanticen una mayor productividad de una manera ambientalmente sostenible. En este contexto, el desarrollo de tecnologías orientadas al cuidado del medio ambiente, la reutilización de los residuos y la generación de energías limpias de bajo costo son indispensables (Sardare & Admane 2013).

Dentro de estas tecnologías, los cultivos de microalgas han cobrado relevancia debido a ser son eco amigables (Olguin, 2003). Su relevancia radica no solo en su función ecológica, sino también en su potencial para aplicaciones en la agricultura sostenible, biotecnología y bioenergía (Cabanelas et al., 2016; Wen et al., 2016). Las microalgas pueden recuperar nutrientes de nutrientes y la biorremediación de aguas residuales (Bhuyar et al., 2019), especialmente nitratos y fosfatos (Delrue et al., 2016) y absorber metales pesados, fijar nitrógeno (Harun et al., 2010). Además, una de las características más sobresalientes de las microalgas es su rápido crecimiento, alta eficiencia fotosintética y menores demandas de recursos naturales en comparación con los cultivos agrícolas convencionales, por lo que representan una fuente de nutrientes y compuestos de interés para diversas aplicaciones, incluyendo la acuicultura, cosméticos, productos farmacéuticos, biocombustibles y como fertilizantes biológicos (Agšpole et al., 2024; Spolaore et al., 2006). Estas características contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas productivos (Abdel-Raouf et al., 2012), al reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos y contribuir al medio ambiente (Barclay et al., 2013; Schrammel et al., 2022). En este sentido, su aprovechamiento se alinea con los principios de la economía circular, donde los residuos pueden transformarse en insumos de alto valor agregado (Ning et al., 2022).

En la agricultura, las microalgas muestran potencia como bioestimulantes (Tripathi et al., 2008) y biofertilizantes (Grageda-Cabrera et al., 2018), pueden aplicarse mediante

diferentes métodos, como aplicaciones foliares, enmiendas al suelo o tratamiento de semillas (Marks et al., 2017). Su efecto bioestimulante se asocia con la presencia de compuestos bioactivos derivados de su versatilidad metabólica, los cuales pueden actuar como promotores del crecimiento vegetal (Patel et al., 2024). Su uso mejora la germinación, el desarrollo radical y el rendimiento de las plantas, además de contribuir a mitigar los efectos del estrés abiótico (Marín-Marín et al., 2024; Mostafa et al., 2024). Estos efectos se atribuyen a la presencia de macro y micronutrientes, fitohormonas, vitaminas, aminoácidos y antioxidantes, que estimulan el metabolismo vegetal, la eficiencia fotosintética y la calidad nutrimental del fruto (Bhuyar et al., 2019; Gómez, 2007; Patel et al., 2024).

A pesar de los avances en el uso de bioestimulantes en cultivos hortícolas, la información sobre los efectos de microalgas, particularmente de *Neochloris vigensis*, es aún limitada, especialmente en sistemas hidropónicos y en relación con la dinámica nutrimental y la eficiencia de uso de nutrientes en plantas de *Solanum lycopersicum* L. Esta falta de información limita su aprovechamiento en sistemas de producción intensivos, donde la eficiencia en el uso de nutrientes es un factor determinante para la productividad.

La información generada contribuirá al desarrollo de estrategias más sostenibles para la producción agrícola, al reducir el uso de fertilizantes inorgánicos y promover alternativas que incrementen la productividad sin comprometer los recursos naturales. Asimismo, el aprovechamiento de la biomasa microalgal representa una alternativa dentro de los esquemas de economía circular, al transformar residuos en insumos de alto valor para la agricultura.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial de *N. vigensis* en tres enfoques complementarios: a) evaluar el crecimiento, la producción de biomasa y la capacidad de remoción de nutrientes en diferentes concentraciones de inóculo en condiciones fotoautotróficas; b) determinar su efecto como suspensión microalgal sobre el crecimiento, la acumulación nutrimental y la eficiencia de uso de nutrientes en genotipos de tomate en un sistema de balsa flotante; c) evaluar el efecto

del tipo de aplicación y la concentración de suspensión microalgal sobre el crecimiento, calidad del fruto y el rendimiento en diferentes genotipos de *Solanum lycopersicum* L., con el fin de determinar su impacto en la productividad del cultivo.

1.1 Literatura citada

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Agricultural importance of algae. *African Journal of Biotechnology*, 11(54), 11648–11658. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3983>
- Augšpole, I., Sivicka, I., Kampuss, K., Semjonovs, P., & Missa, I. (2024). Biologically active compounds in tomato fruits under the application of water–ethanol *Spirulina*, *Dunaliella* and *Chlorella* microalgae extracts on plants' leaves. *International Journal of Plant Biology*, 15, 1338–1352. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040092>
- Barclay, W., Apt, K., & Dong, X. D. (2013). Commercial production of microalgae via fermentation. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of microalgal culture* (pp. 134–145). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch9>
- Bhuyar, P., Yusoff, M. M., Rahim, M. H. A., Sundararaju, S., Maniam, G. P., & Govindan, N. (2020). Effect of plant hormones on the production of biomass and lipid extraction for biodiesel production from microalgae *Chlorella* sp. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(4), 671–674. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.671-674>
- Cabanelas, I. T. D., van der Zwart, M., Kleinegris, D. M. M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2016). Sorting cells of the microalga *Chlorococcum littorale* with increased triacylglycerol productivity. *Biotechnology for Biofuels*, 9, Article 183. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0615-z>
- Delrue, F., Alvarez-Diaz, P. D., Fon-Sing, S., Fleury, G., & Sassi, J.-F. (2016). The environmental biorefinery: Using microalgae to remediate wastewater, a win–win paradigm. *Energies*, 9(3), Article 132. <https://doi.org/10.3390/en9030132>

- Gómez Luna, L. M. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19(2), 3–20.
- Grageda-Cabrera, O., González-Figueroa, S., Vera-Núñez, J., Aguirre-Medina, J., & Peña-Cabriales, J. (2018). Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 281–289. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071>
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.004>
- Marín-Marín, C. A., Estrada, J. A., Delgado-Naranjo, J. M., Zapata-Ocampo, P. A., & Peñuela-Vásquez, M. (2024). *Cyanobacteria and microalgae as potential sources of biofertilizers: A review*. *Actualidades Biológicas*, 46(120), Article e4606. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi/v46n120a06>
- Marks, E., Miñón, J., Pascual, A., Montero, O., Navas, L., & Rad, C. (2017). Application of a microalgal slurry to soil stimulates heterotrophic activity and promotes bacterial growth. *Science of the Total Environment*, 605–606, 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.169>
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. B. (2024). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 21181–21191. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04460-x>
- Ning, H., Li, R., & Zhou, T. (2022). Machine learning for microalgae detection and utilization. *Frontiers in Marine Science*, 9, Article 947394. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.947394>
- Olguin, E. J. (2003). Phycoremediation: Key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances*, 22(1–2), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00130-7)

- Patel, A., Rantzos, C., Krikigianni, E., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2024). *A bioprocess engineering approach for the production of hydrocarbons and fatty acids from green microalga under high cobalt concentration as the feedstock of high-grade biofuels*. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17, Article 64. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02512-6>
- Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80, 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Sardare, M. D., & Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil—Hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(3), 299–304. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203013>
- Schrammel, M., Seebacher, L. M., & Feichtinger, J. (2022). Actor groups influencing and shaping sustainable microalgae value chains in Europe. *Frontiers in Aquaculture*, 2, Article 1186325. <https://doi.org/10.3389/faquc.2022.1186325>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Tripathi, R., Dwivedi, S., Shukla, M., Mishra, S., Srivastava, S., Singh, R., Rai, U., & Gupta, D. (2008). Role of blue-green algae biofertilizer in ameliorating nitrogen demand and fly ash stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 70(10), 1919–1929. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.038>
- Wen, X., Du, K., Wang, Z., Peng, X., Luo, L., Tao, H., Xu, Y., Zhang, D., Geng, Y., & Li, Y. (2016). Effective cultivation of microalgae for biofuel production: A pilot-scale evaluation of a novel oleaginous microalga *Graesiella* sp. WBG-1. *Biotechnology for Biofuels*, 9, Article 123. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0541-7>

CAPÍTULO 2. Revisión de literatura

2.1 Estrategias en la promoción del crecimiento vegetal

Bajic y Sánchez (2020) mencionaron que para lograr la reducción de la dependencia de fertilizantes químicos y plaguicidas es necesario explorar y comprender qué ocurre en las interacciones mutualistas que se dan entre las raíces de las plantas y la microbiota de la rizosfera y que cuando el sector agrícola aproveche este potencial, será posible avanzar hacia una agricultura sostenible y segura. Por ello, las investigaciones evalúan la diversidad genética y bioquímica de los microorganismos de la rizosfera, su potencial como fijadores de nitrógeno atmosférico, solubilización de fosfatos, aporte de nutrientes, la producción de hormonas vegetales y de sustancias capaces de captar hierro (sideróforos). Así mismo en la selección de los microorganismos más eficientes en ambientes en condiciones ambientales controladas de laboratorio, invernadero y campo, y bajos costos de producción cuando se utilizan inoculantes microbianos en sustitución de otros compuestos químicos (Pedraza et al., 2010).

2.2 Bioestimulantes

Definición de bioestimulante

De acuerdo con Du Jardin (2015a) el término "bioestimulante" fue acuñada por especialistas en horticultura para describir a las "sustancias que promueven el crecimiento de las plantas sin ser nutrimentos, mejoradores de suelo ni pesticidas". Du Jardin (2015a) señaló que la primera definición de bioestimulante pudo deberse a Zhang y Schmidt en 1997, quienes los definieron como "materiales que, en cantidades mínimas, promueven el crecimiento de las plantas". Desde el principio parece que los bioestimulantes "se describen como sustancias que promueven el crecimiento de las plantas sin ser nutrimentos, enmiendas del suelo ni pesticidas" y se definen "por lo que hacen más que por lo que son". La palabra "bioestimulante" fue definida por primera vez por Kauffman et al. (2007, citado por Du Jardin, 2015a) como: "materiales, distintos de los fertilizantes, que favorecen el crecimiento de las plantas cuando se aplican en bajas

cantidades" y que "están disponibles en una gran variedad de formulaciones y con distintos ingredientes".

Al principio la definición se centró en productos químicos, pero se vio que la acción de los bioestimulantes también podía responder al uso de bacterias y hongos, por lo que había que añadirlos a la definición. Por lo que Du Jardin (2015a) puntualiza algunas de las características principales de un bioestimulante:

- a) La naturaleza de los bioestimulantes es diversa.
- b) Las funciones fisiológicas de los bioestimulantes son diversas.
- c) Las funciones agrícolas de los bioestimulantes son "mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los rasgos de calidad de los cultivos".

Para el año 2015, Du Jardin propuso la siguiente definición: "Un bioestimulante vegetal es cualquier sustancia o microorganismo aplicado a las plantas con el objetivo de mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los atributos de calidad de los cultivos, independientemente de su contenido en nutrientes".

En ese contexto, el Consejo de Europeo de la Industria de Bioestimulantes (EBIC) y la Asociación de Bioestimulantes realizan el Primer Congreso Mundial sobre el uso de bioestimulantes que tuvo lugar en Estrasburgo en el año 2012 del cual deriva la definición más actual de bioestimulante y que al igual que la de Du Jardin (2015a) se acerca a la definición reguladora final Europea (Reglamento 2019/1009 que regula los productos fertilizantes en la Unión Europea, estableciendo normas para la comercialización, seguridad y calidad). En este sentido, el término bioestimulante se refiere a sustancias o microorganismos que, cuando se aplican a las plantas, por vía foliar o edáfica, estimulan procesos naturales que promueven y mejoran la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de los cultivos o el rendimiento (Dehkordi et al., 2021; Du Jardin, 2015a).

Tipo de bioestimulantes y su clasificación

De acuerdo con Du Jardin (2015a), las categorías en que engloban a los bioestimulantes son los siguientes:

- Sustancias húmicas (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).
- Hidrolizados de proteínas y compuestos de nitrogenados.
- Extractos de algas y de plantas superiores.
- Quitosano y otros polímeros.
- Compuestos inorgánicos.
- Bacterias y hongos benéficos.

De acuerdo con Chiaiese et al. (2018) los bioestimulantes juegan un papel fundamental en la agricultura como una herramienta para mejorar el rendimiento de los cultivos, resistencia al estrés ambiental y uso de nutrientes. Los bioestimulantes incluyen diferentes grupos de organismos eucariotas y procariotas por lo que un gran número de especies de bacterias, hongos y algas son potenciales candidatos para ser utilizados con esta finalidad. Entre estos destacan las microalgas y cianobacterias por su estructura unicelular, alta tasa fotosintética, capacidad de crecimiento heterotrófico, adaptabilidad a las aguas residuales industriales y domésticas y por su posibilidad de ser manipuladas desde un punto de vista metabólico para la obtención de bioproductos (Chiaiese et al., 2018).

Los bioestimulantes no aportan nutrientes como su función principal y tampoco se dirigen al control directo de plagas y patógenos, sino que proporcionan herramientas a las plantas respecto a la regulación/modificación de los procesos fisiológicos de señalización, metabolismo, captación y transporte, lo que favorece un mayor crecimiento de las mismas, a una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes, a mitigar las limitaciones inducidas por el estrés y a aumentar el rendimiento y calidad de los cultivos (Calvo et al., 2014).

2.3 Generalidades de las algas

De acuerdo con el tamaño y composición de las células, las algas se dividen en macroalgas y microalgas (Darzins & Garofalo, 2009).

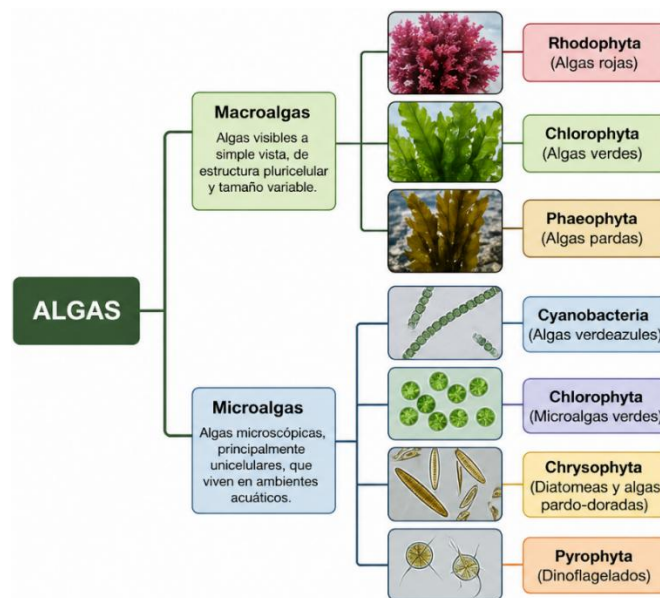


Figura 1. Clasificación general de las algas basada en sus principales grupos taxonómicos. Adaptado de Barsanti y Gualtieri (2014)

Macroalgas

Las macroalgas (algas marinas) son la subclase de algas que tienen una organización multicelular y han desarrollado arreglos anatómicos que se asemejan a tallos, raíces y hojas de plantas superiores. Las macroalgas poseen núcleos y orgánulos que alcanzan un gran tamaño, su diferente naturaleza las ha hecho abundantes en la tierra (Darzins & Garofalo, 2009).

Microalgas

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares, que viven en ambientes salinos o de agua dulce, que convierten la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en biomasa de algas (Ruane et al., 2010). Las microalgas han evolucionado a partir de grandes complejos captadores de luz para lograr la máxima absorción de luz con poca luz en la que viven las microalgas (Ort et al., 2010).

2.4 Usos y aplicaciones de las microalgas

Acuicultura

Actualmente las microalgas constituyen la principal fuente de alimento utilizada en la nutrición de moluscos, rotíferos y fases larvarias de crustáceos, siendo además utilizadas

como complemento en las dietas de peces o como medio para mantener la calidad del agua (Akatsuka, 1990; Cresswell, 1981)

Agricultura

Los fertilizantes químicos, actualmente, presentan problemas ambientales y de salud, así que, se busca implementar prácticas agrícolas sustentables. Las algas pueden absorber eficientemente el exceso de nutrientes de las vías fluviales, lo que las convierte en un recurso valioso potencialmente capaz de reemplazar los fertilizantes sintetizados y extraídos para la agricultura (Mau et al., 2021). Tratar aguas residuales con microalgas y producir biomasa es un procedimiento eficaz, ecológico y de bajo costo (Akatsuka, 1990; Cresswell, 1981). Esto se basa en la capacidad de las microalgas para utilizar nutrientes inorgánicos, principalmente nitrógeno y fósforo, así como, carbono orgánico e inorgánico, para su crecimiento, y simultáneamente, reducir estas sustancias en el agua (Lage et al., 2021).

Las microalgas exhiben un gran potencial para contrarrestar los desafíos inminentes en los sectores nutracéutico, farmacéutico y biomaterial, pero carecen de viabilidad económica. Los sistemas biotecnológicos para el control de la contaminación podrían mejorar la viabilidad económica de la materia prima de microalgas, con la selección de cepas adecuadas que promuevan de manera sostenible la productividad de las microalgas (Haberkorn et al., 2020). Diversos estudios identificaron microalgas que pueden utilizarse para producir biofertilizantes como es el caso de *Chlorella vulgaris* que se ha utilizado en la germinación de semillas. Las semillas tratadas con *Chlorella vulgaris* mostraron un aumento del crecimiento, además de que las raíces y tallos de las plantas tuvieron efectos positivos (Bumandalai & Tserennadmid, 2019). Además, Kusvuran (2021) menciona que las microalgas como *C. vulgaris* puede ayudar a las plantas a mejorar la absorción de nutrientes, crecimiento y tolerancia abiótica a los factores estresantes. Aunado a esto, la biomasa de una cianobacteria fijadora de N₂ es la principal fuente de macronutrientes; además de que la biomasa de cianobacterias sustituye a la urea en el crecimiento de algunos cultivos (Nascimento et al., 2019).

Biomedicina y farmacología

Utilización de dietas de adelgazamiento y tratamiento de heridas, algunas microalgas presentan efectos hipocolesterolemicos, actividad antibacteriana, antifúngica, inmunoreguladora y antitumoral (Akatsuka, 1990; Cresswell, 1981).

Alimentación humana y animal

Las microalgas representan una fuente de proteínas Single Cell Protein con posibles aplicaciones en la nutrición humana, pero principalmente se utiliza como complemento del peso animal. Los hidrolizados proteicos son de gran utilidad en la industria medico farmacéutica (Akatsuka, 1990; Cresswell, 1981).

2.5 Cultivo de microalgas

La composición y la productividad de las microalgas las determina: la alcalinidad del medio, el pH, la temperatura, la disponibilidad y concentración de nutrientes, la intensidad y tipo de luz, la densidad celular del cultivo y la contaminación o depuración por otros organismos. En promedio las microalgas duplican su biomasa a las 24 horas. Sin embargo, en fase exponencial algunas microalgas pueden duplicar su biomasa en tiempos tan cortos como 3,5 horas (Brenan & Owende, 2010).

De acuerdo con Lee y Shen (2004) las fases de crecimiento presentes en un cultivo de microalgas son (Figura 2):

Fase de latencia

En la fase inicial ocurre un retardo en el desarrollo de las células, debido al ajuste fisiológico por los cambios en las condiciones de nutrientes o del medio de cultivo.

Fase exponencial

Llamada también fase de crecimiento acelerado, en el cual las células se han adaptado al medio, y comienzan a multiplicarse y crecen en forma exponencial.

Fase de crecimiento lineal

Conforme al cultivo va creciendo se produce una disminución de nutrientes, cambios de pH y alteración de otros factores como consecuencia del incremento de la población. (Romo Piñera, 2002).

Fase estacionaria

En esta ya no se observa una división celular neta, es decir que el número de células alcanzado se mantiene constante por cierto periodo de tiempo debido al balance entre la natalidad y mortalidad que presenta el cultivo (Romo Piñera, 2002).

Fase de muerte

En esta fase las células empiezan a morir, aunque pueden durar en la fase estacionaria semanas e incluso meses (Romo Piñera, 2002).

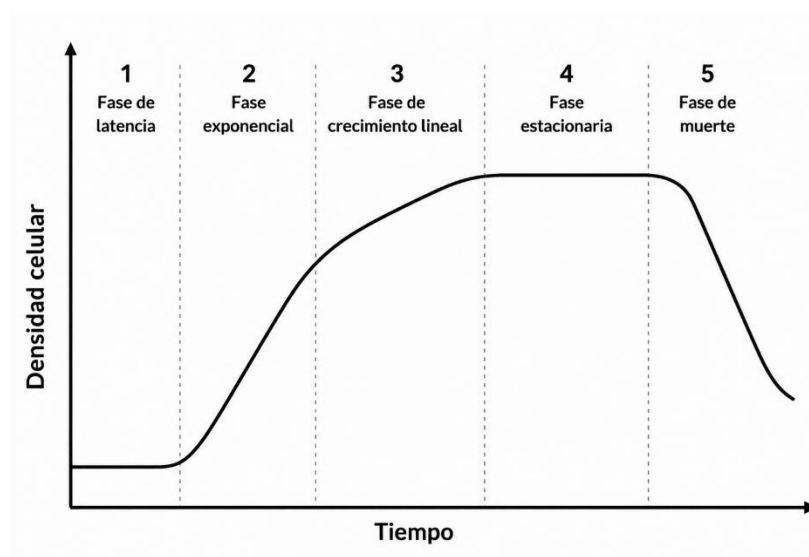


Figura 2. Curva de crecimiento de un cultivo de microalgas (adaptado de Fogg, 1987)

donde, 1: fase de latencia; 2: fase exponencial; 3: fase de crecimiento lineal; 4: fase estacionaria; 5: fase de muerte.

2.6 Parámetros que influyen en el crecimiento de las microalgas

Como todo organismo vivo, las condiciones físicas tienen una gran influencia en el crecimiento de las microalgas. Cada especie tiene un particular intervalo de temperatura,

intensidad de luz, salinidad, pH, nutrientes dióxido de carbono y oxígeno para la producción de un máximo crecimiento. (Romo Piñera, 2002).

En promedio, las microalgas duplican su biomasa en 24 horas. Sin embargo, en la fase exponencial algunas microalgas pueden doblar su biomasa en tiempos tan cortos como tres horas y media (Abalde et al., 1995).

Luz

Las microalgas son microorganismos que convierten la energía lumínica en metabólica mediante la fotosíntesis, esta energía lumínica puede ser recibida de forma natural en ciclos de día y noche o artificial, que a su vez puede ser de forma continua o discontinua en ciclos alternados de luz y oscuridad. (Romo Piñera, 2002). Se han encontrado diversos estudios que sostienen que a altas intensidades de luz la producción de polisacáridos en las células tiende a aumentar (Richmond, 2004; Ruiz-Martínez, 2011).

pH

El pH puede afectar muchos de los procesos bioquímicos asociados con el crecimiento y metabolismos de las algas, incluso la disponibilidad de los iones de nitrógeno como nutrientes. El rango de pH generalmente varía de 8 y 10 aunque para la producción de masa el pH recomendable está alrededor de 8.1 y 8.7; valores de pH excesivamente bajos o altos disminuyen la productividad. (Park, 2010; Ruiz Martínez, 2011).

Salinidad

La concentración de sales inorgánicas disueltas, tanto en agua dulce como marinas, pueden potencialmente afectar al crecimiento de las microalgas en función de su actividad osmótica. El efecto de salinidad adquiere más influencia cuando se relaciona con otras variables, como temperatura, luz, fuente de nitrógeno y concentración de nutrientes. El intervalo de salinidad óptimo para una microalga depende de la especie, para microalgas clorofitas la salinidad óptima oscila entre 25 y 35 g L⁻¹ (Abalde et al., 1995).

Nutrientes

Para obtener un buen crecimiento celular de las microalgas requieren nutrimentos en cantidades adecuadas (Abalde et al., 1995; Grobbelar, 2013). Los medios nutritivos están

compuestos por macronutrientes (nutrimentos esenciales para la formación estructural de las moléculas, p.ej. nitrógeno, carbono, oxígeno, fósforo, hidrógeno, magnesio, calcio, potasio y azufre), los elementos traza (micronutrientes que son adquiridos por las células en cantidades mínimas, necesarios para la activación de algunas enzimas, p.ej. hierro, manganeso, cobre, cobalto y molibdeno) y vitaminas (biotina, B12 y tiamina), preparados como soluciones patrones (Watanabe, 2005) y cuyas concentraciones varían principalmente del objetivo de estudio y la especie de microalga (Richmond, 1999).

El carbono, nitrógeno y fósforo constituyen los nutrientes limitantes para el crecimiento microalgal en aplicaciones biotecnológicas (Grobbelar, 2013). Con el propósito de obtener productos de alto valor agregado como lípidos, proteínas, carbohidratos y pigmentos que pueden ser utilizados desde el punto de vista de la comercialización, es necesario producir biomasa a gran escala (Liu y Hu, 2013; Schenk et al., 2008).

Nitrógeno

El nitrógeno es el nutriente más importante que contribuye a producción de biomasa. Además, es un factor crítico para la regulación del contenido lipídico celular de las microalgas. Sin embargo, en exceso puede disminuir el crecimiento celular. (Park, 2010). La fuente de nitrógeno puede ser suministrada como nitrato (NO_3), amonio (NH_4), o urea (Richmond, 2004).

Fósforo

El fósforo es esencial para el crecimiento de las algas, así como para varios procesos como la transferencia de energía, biosíntesis de ácidos nucleicos, etc. El contenido de fósforo en las células está alrededor del 1% de la biomasa; además es uno de los factores más importantes para el crecimiento de las algas en biotecnología y puede ser suministrado como ortofosfato (PO_4). El suministro de fósforo influencia a la composición de la biomasa producida, especialmente en el contenido de lípidos y carbohidratos. (Richmond, 2004).

2.7 Aplicación de microalgas como fitoestimulantes y bioestimulantes

Osman et al. (2010) menciona que la aplicación de fertilizantes líquidos preparados a partir de microalgas y cianobacterias mejora el crecimiento vegetal respecto a lo

observado con el uso de fertilizantes de base química, por lo que infiere se debe al contenido de metabolitos reguladores del crecimiento vegetal, ejerciendo en la planta efectos similares a los descritos por rizobacterias. Por su parte, Chiaiese et al. (2018) hicieron referencia a que se trata de compuestos fenólicos y flavonoides, que, junto a las proteínas, son precursores clave de fitohormonas y compuestos aromáticos secundarios que desempeñan un papel esencial en la embriogénesis, la organogénesis, así como en la protección contra el estrés osmótico.

Cuando se aplican biofertilizantes al suelo, estos mejoran el contenido de materia orgánica, reducen el contenido de materia oxidable, y proporcionan oxígeno a la rizosfera, amortiguan el pH (Biswajita et al., 2020) además de su efecto promotor del crecimiento vegetal, el cuál de acuerdo con Supraja et al. (2020) se debe al contenido de proteínas de las cianobacterias y microalgas, sumado al contenido en macro y micronutrientes como el sodio (Na), potasio (K) y calcio (Ca), así como de carbohidratos.

Chanda et al. (2021) sugirieron que los extractos de microalgas y cianobacterias pueden inducir cambios en el metabolismo vegetal, incluyendo acumulación de compuestos relacionados con la tolerancia al estrés abiótico y mecanismos de defensa. En este sentido, la realización de pruebas agronómicas a partir de los compuestos bioactivos purificados podría ayudar para el estudio en profundidad de los mecanismos de acción derivados de este tipo de extractos.

2.8 Sustancias bioactivas de cultivos de microalgas y cianobacterias

Las microalgas y cianobacterias son microorganismos fotosintéticos capaces de sintetizar una amplia diversidad de metabolitos que pueden ser aplicados con fines alimentarios, agrícola, farmacéutico e industrial. Su rápida tasa de crecimiento y su capacidad de adaptación a ambientes extremos los posicionan como organismos idóneos para la producción a gran escala de compuestos bioactivos. La optimización de su cultivo depende del control de diversos factores, como la disponibilidad de nutrientes, la intensidad lumínica, la fuente de carbono, la salinidad y la temperatura, los cuales influyen directamente en el crecimiento y en la biosíntesis de metabolitos. Asimismo, pueden utilizarse activadores químicos, como fitohormonas y otras sustancias reguladoras, para

modificar rutas metabólicas y potenciar la producción de compuestos de interés (Chiaiese et al., 2018).

Entre los principales metabolitos destacan los polisacáridos, pigmentos, ácidos grasos y compuestos fenólicos, los cuales presentan aplicaciones relevantes en salud, agricultura y medio ambiente (Hernández-Salón et al., 2024).

2.9 *Neochloris vigensis* Archibald

Neochloris vigensis es una microalga verde unicelular de morfología esférica, ampliamente distribuida en ambientes de agua dulce. Sus células presentan diámetros entre 8 y 16 µm durante la fase exponencial de crecimiento, pudiendo alcanzar hasta los 35 µm en la fase estacionaria, con un notable engrosamiento de la pared celular conforme avanza el desarrollo. A nivel intracelular, se caracteriza por la presencia de un cloroplasto denso con uno o varios pirenoides rodeados por una vaina de almidón, así como por una condición multinucleada. La reproducción ocurre de forma asexual mediante formación de zoosporas, aplanosporas y autosporas, mientras que la reproducción sexual no ha sido observada. Estas características estructurales y reproductivas evidencian su capacidad de adaptación y proliferación en condiciones acuáticas (Archibald, 1973).

Se ha reportado que, a nivel metabólico, la presencia de pirenoides rodeados por almidón sugiere una activa fijación y almacenamiento de carbono, mientras que la formación de gotas lipídicas en células envejecidas indica procesos de acumulación de reservas. Estas características reflejan una elevada plasticidad fisiológica, lo que podría estar relacionada con su capacidad potencial para la asimilación de nutrimentos y producción de biomasa bajo diferentes condiciones de cultivo (Archibald, 1973).

Taxonomía de *Neochloris vigensis*

Neochloris vigensis pertenece al grupo de las microalgas verdes unicelulares del filo *Chlorophyta*, caracterizadas por su capacidad fotosintética y su distribución en ambientes acuáticos, principalmente de agua dulce. Su clasificación dentro del orden *Chlorellales* refleja su cercanía filogenética con géneros ampliamente estudiados como *Chlorella*, los cuales presentan alto potencial biotecnológico.

De acuerdo con el National Center for Biotechnology Information:

Dominio	<i>Eucariota</i>
Reino	<i>Viridiplantae</i>
Filo	<i>Chlorophyta</i>
Clase	<i>Trebouxiophyceae</i>
Orden	<i>Chlorellales</i>
Familia	<i>Chlorellaceae</i>
Género	<i>Neochloris</i>
Especie:	<i>Neochloris vigensis</i>

2.10 Cultivo de tomate

Importancia económica y productiva

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor importancia en el mundo, debido a su alto valor económico, nutricional y amplia distribución geográfica. Su producción puede llevarse a cabo en campo abierto o en sistemas protegidos e hidropónicos, lo que permite su cultivo durante todo el año en diferentes condiciones ambientales, lo que favorece el desarrollo de tecnologías enfocadas en mejorar la productividad y la eficiencia en el uso de recursos, particularmente de agua y fertilizantes (FAO, 2023; Heuvelink, 2018). De acuerdo con la FAO (2023) el tomate es uno de los cultivos hortícolas más producidos a nivel mundial, siendo China, India y Estados Unidos los principales productores. En México, los principales productores son Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán y Jalisco y los rendimientos varían según el sistema de producción. Mientras que en campo abierto existen limitantes ambientales, en sistemas hidropónicos se obtienen los mayores rendimientos debido al control de variables como la nutrición, temperatura y humedad relativa (Resh, 2013; Savvas & Gruda, 2018)

Etapas fenológicas del tomate

El desarrollo del tomate comprende etapas fenológicamente definidas: germinación, crecimiento vegetativo, floración, cuajado y desarrollo del fruto (Heuvelink, 2018). La etapa de desarrollo del fruto está asociada con cambios fisiológicos importantes, como la acumulación de azúcares, pigmentos y compuestos de calidad (Giovannoni, 2004). Cada etapa presenta requerimientos nutricionales específicos, lo que hace necesario un manejo agronómico adecuado para asegurar el desarrollo óptimo del cultivo (Marschner, 2012).

Requerimientos nutricionales y ambientales

El tomate presenta una alta demanda de nutrimentos, particularmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales están relacionados con el crecimiento, desarrollo y calidad del fruto (Marschner, 2012). Otros nutrimentos como el calcio (Ca) y magnesio (Mg) son esenciales para la estabilidad celular y la fotosíntesis, mientras que micronutrimentos como (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B) participan en procesos metabólicos clave para la planta (Havlin et al., 2014). En cuanto a los factores ambientales, la temperatura óptima de desarrollo de tomate es entre 18 y 25 °C, con un pH en solución nutritiva entre 5.5 y 6.5 y adecuada disponibilidad de luz (Resh, 2013). En el aporte de los nutrimentos mediante la solución nutritiva permite una mayor eficiencia en la absorción en comparación de los sistemas de cultivo en suelo (Savvas & Gruda, 2018).

Uso de bioestimulantes en tomate

El uso de bioestimulantes ha incrementado en la agricultura como una estrategia para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos. Estos incluyen microorganismos benéficos, extractos vegetales, sustancias húmicas y microalgas, lo cuales actúan mediante mecanismos que favorecen la absorción de nutrimentos, el desarrollo radical y la tolerancia al estrés (Du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2020). En este contexto, las microalgas han mostrado un alto potencial como bioestimulante, debido a su contenido de compuestos bioactivos, como aminoácidos, fitohormonas y antioxidantes que promueven el crecimiento vegetal (Bulgari et al., 2019; Khan et al., 2009). En tomate, se han reportado incrementos de biomasa y absorción de nutrimentos y rendimientos después de la aplicación de extractos microalgales (Colla et al., 2015). Sin embargo, información sobre el uso de microalgas, particularmente *Neochloris vigensis*, es limitada, especialmente en sistemas hidropónicos y en relación con la dinámica nutrimental y la eficiencia de uso de nutrimentos.

2.11 Literatura citada

Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E., & Herrero, C. (1995). *Microalgas: Cultivo y aplicaciones*. Universidad de Coruña.

- Archibald, P. A. (1973). The genus *Neochloris* Starr (Chlorophyceae, Chlorococcales). *Phycologia*, 12(3–4), 187–193.
- Akatsuka, I. (1990). *Introduction to applied phycology*. SPB Academic Publishing.
- Bajic, D., & Sanchez, A. (2020). The ecology and evolution of microbial metabolic strategies. *Current Opinion in Biotechnology*, 62, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.003>
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology* (2nd ed.). CRC Press.
- Biswajita, P., Somanath, B., Srimanta, P., Chhandashree, B., Rabindra, N., MubarakAli, D., & Mrutyunjay, J. (2020). Oxidative stress responses in microalgae. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 25, Article 101595. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101595>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae: A review of technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Bumandalai, O., & Tserennadmid, R. (2019). Effect of *Chlorella vulgaris* as a biofertilizer on germination of tomato and cucumber seeds. *International Journal of Aquatic Biology*, 7(2), 95–99. <https://doi.org/10.22034/ijab.v7i2.582>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Chanda, M. M., Rachidi, F., Alaoui, M. H., et al. (2021). Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect. *Journal of Applied Phycology*, 33, 3779–3795. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02559-0>
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, M. C., & Rouphael, Y. (2018). Renewable sources of plant biostimulation: Microalgae as a sustainable means to improve crop performance. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 1782. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01782>

- Cresswell, R. C., & Syrett, P. J. (1981). Uptake of nitrate by the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Experimental Botany*, 32, 19–25.
- Darzins, A., & Garofalo, R. (2009). Algal biofuels: What is the real potential? *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(4), Article 426. <https://doi.org/10.1002/bbb.167>
- Dehkordi, R. A., Roghani, S. R., Mafakheri, S., & Asghari, B. (2021). Effect of biostimulants on morpho-physiological traits of fenugreek under water deficit stress. *Scientia Horticulturae*, 283, Article 110077. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110077>
- Du Jardin, P. (2015a). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Fogg, G. E., & Thake, B. (1987). *Algae cultures and phytoplankton ecology* (3rd ed.). University of Wisconsin Press.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Agricultural production statistics 2000–2022*. <https://www.fao.org/3/cc9205en/cc9205en.pdf>
- Giovannoni, J. J. (2004). Genetic regulation of fruit development and ripening. *The Plant Cell*, 16(Suppl. 1), S170–S180. <https://doi.org/10.1105/tpc.019158>
- Grobbelar, J. (2013). Inorganic algal nutrition. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of microalgal culture* (pp. 123–133). Wiley.
- Haberkorn, I., Walser, J., Helisch, H., Böcker, L., Belz, S., Schuppler, M., Fasoulas, S., & Mathys, A. (2020). Characterization of *Chlorella vulgaris* associated microbial communities. *Journal of Phycology*, 56(5), 1308–1322. <https://doi.org/10.1111/jpy.13026>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson.
- Heuvelink, E. (Ed.). (2018). *Tomatoes* (2nd ed.). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0000>

- Hernández-Salón, S., Solano Montero, S., Rojas Hernández, A., Hernández Calderón, A., & Oporta Oporta, A. (2024). Cianobacterias y microalgas: Potencial para la salud, la agricultura y el medio ambiente. *Revista Innovación Universitaria*, 7, 72–121. <https://doi.org/10.64312/9djmqx11>
- Kusvuran, S. (2021). Microalgae (*Chlorella vulgaris*) alleviates drought stress of broccoli plants. *Horticultural Plant Journal*, 7(3), 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.03.007>
- Lage, S., Toffolo, A., & Gentili, F. G. (2021). Microalgal growth, nitrogen uptake and storage in wastewater. *Chemosphere*, 276, Article 130122. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130122>
- Lee, Y. K., & Shen, H. (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Publishing.
- Mau, L., Kant, J., Walker, R., Kuchendorf, C. M., Schrey, S. D., Roessner, U., & Watt, M. (2021). Wheat can access phosphorus from algal biomass. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 631314. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.631314>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Nascimento, M., Battaglia, M. E., Sanchez Rizza, L., Ambrosio, R., Arruebarrena Di Palma, A., & Curatti, L. (2019). Biomass of N₂-fixing cyanobacteria as fertilizer. *Algal Research*, 43, Article 101652. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101652>
- Ort, D. R., Zhu, X., & Melis, A. (2010). Optimizing antenna size to maximize photosynthetic efficiency. *Plant Physiology*, 155(1), 79–85. <https://doi.org/10.1104/pp.110.165886>
- Osman, M. E. H., El-Sheekh, M. M., El-Naggar, A. H., & Gheda, S. F. (2010). Cyanobacteria as biofertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 46(8), 861–875. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0491-7>
- Park, J. C. (2010). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>

- Pedraza, R., Teixeira, K. R., Fernández-Scavino, A., García de Salomone, I., Baca, B., Azcón, R., Baldani-Divan, V. L., & Bonilla, R. (2010). Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 155–164. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:206
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production* (7th ed.). CRC Press.
- Richmond, A. (1999). Physiological principles in mass production. In Z. Cohen (Ed.), *Chemicals from microalgae* (pp. 353–386). Taylor & Francis.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture*. Blackwell Science.
- Romo Piñera, A. (2002). *Manual para el cultivo de microalgas*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Ruane, J., Sonnino, A., & Agostini, A. (2010). Bioenergy and agricultural biotechnologies. *Biomass and Bioenergy*, 34(10), 1427–1439. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.011>
- Ruiz-Martínez, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia.
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry: A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Schenk, P., Thomas-Hall, S., Stephens, S., Marx, U., Mussgnung, J., Posten, C., Kruse, O., & Hankamer, B. (2008). Second generation biofuels. *BioEnergy Research*, 1, 20–43. <https://doi.org/10.1007/s12155-008-9008-8>
- Supraja, K. V., Behera, B., & Balasubramanian, P. (2020). Microalgal extracts as biostimulants. *Industrial Crops and Products*, 151, Article 112453. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>

Watanabe, M. (2005). Freshwater culture media. In R. Andersen (Ed.), *Algal culturing techniques* (pp. 13–20). Elsevier.

CAPÍTULO 3. Efecto de la concentración de inóculo sobre el crecimiento y remoción de nutrimentos por *Neochloris vigensis* Archibald en condiciones fotoautotróficas

Resumen

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos capaces de fijar CO₂ y producir biomasa con alto valor biotecnológico. Entre ellas, el género *Neochloris* destaca por su potencial productivo; sin embargo, su eficiencia depende de las condiciones de cultivo y de la concentración de inóculo. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de inóculo de *Neochloris vigensis* sobre el crecimiento, la producción de biomasa y la remoción de nutrimentos en cultivo fotoautotrófico. La cepa fue aislada del río Lerma mediante diluciones seriadas en medio BBM e identificada mediante análisis molecular de la región ITS con los oligonucleótidos ITS4 e ITS5. Se evaluaron ocho concentraciones de inóculo (0.00–0.54 g L⁻¹) con aireación continua y fotoperiodo de 12 h. El crecimiento se determinó por 30 d mediante densidad óptica (OD₇₅₀) y la biomasa final por peso seco. Los datos se analizaron mediante regresión logística, modelos de regresión para la remoción de nutrimentos, análisis de varianza y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados mostraron que la concentración de inóculo influyó significativamente en el crecimiento, la producción de biomasa y la remoción de nutrimentos. El tratamiento con 0.43 g L⁻¹ produjo la mayor biomasa (1.40 g L⁻¹). La remoción siguió el orden: Mn > Mg > Fe > Cu > NO₃⁻ > Zn > Ca > K > H₂PO₄⁻ > B. Los modelos de regresión evidenciaron distintos patrones de respuesta según el nutrimento. Estos resultados destacan el potencial de *N. vigensis* en la remoción de nutrimentos en condiciones fotoautotróficas.

Palabras clave: Biomasa, concentración de inóculo, manganeso, *Neochloris vigensis*, remoción de nutrimentos

Sometido a: No sometido

Estado: No publicado

Introducción

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares o coloniales con una alta capacidad de adaptación a ambientes acuáticos y terrestres, con la capacidad de fijar dióxido de carbono (CO_2) y producir biomasa con alto contenido de proteínas, lípidos, pigmentos y metabolitos secundarios de interés biotecnológico (Gómez, 2007), son capaces de convertir la energía solar en biomasa con una eficiencia de dos a cinco veces mayor que las plantas superiores (Chisti, 2007; Taiz et al., 2015; Wijffels y Barbosa, 2010; Wink, 2010). Una de las ventajas sobresalientes de las microalgas es la capacidad de crecer y realizar fotosíntesis con diferentes fuentes de nutrientes (condiciones autotróficas) y con aguas residuales (condiciones mixotróficas) (Chinnasamy, 2010). Además, de acuerdo con Xu et al. (2006), algunas microalgas pueden crecer en condiciones heterotróficas, usando carbono orgánico en ausencia de luz. Esta plasticidad metabólica les permite adaptarse a diferentes ecosistemas y procesos biotecnológicos, generando biomasa que puede ser utilizada en la alimentación humana y animal, así como en la obtención de compuestos bioactivos (como pigmentos, antioxidantes y ácidos grasos esenciales), biocombustibles, biorremediación y biofertilizantes (Borowitzka, 2013; Chisti, 2007; Plaza et al., 2008). Los metabolitos secundarios presentan gran importancia, debido a que contribuyen a la organización de numerosos sistemas de defensa biológica actúan contra herbívoros. En este contexto, su aplicación como biofertilizantes se alinea con los principios de la agricultura circular, al permitir el reciclaje de nutrientes, la valorización de residuos y la reducción del uso de insumos inorgánicos, favoreciendo sistemas de producción (Chew et al., 2017; Morais et al., 2021).

Las microalgas, al ser consideradas eco amigables, han cobrado relevancia, ya que reciclan eficientemente los contaminantes desde medios líquidos y gaseosos, incorporándolos al metabolismo para la producción de biomasa (Hernández et al., 2014). Además, de la remoción de amonio, nitritos, nitratos y fosfatos, el oxígeno (O_2) producido es liberado en el proceso de fotosíntesis (Salazar, 2005). De esta forma, el desarrollo del cultivo microalgal puede utilizarse para la remoción de minerales en el tratamiento de aguas (Richmond, 2004; Salazar, 2005), donde el objetivo fundamental es la utilización y biotransformación de los nutrientes en biomasa.

El origen de las microalgas se remonta a aproximadamente 3,400 millones de años, cuando organismos fotosintéticos primitivos, pertenecientes al grupo de las cianobacterias, han sido identificados en el registro fósil (Schirrmeister et al., 2011). Estos organismos, a pesar de su carácter primitivo, representaron formas de vida complejas y estructuralmente organizadas. En el amplio grupo de las microalgas, la familia *Chlorellaceae* comprende una importante diversidad taxonómica, con aproximadamente 48 géneros y 258 especies descritas (Song et al., 2023). Dentro de esta familia, el género *Neochloris* ha despertado interés debido a su potencial biotecnológico, particularmente en la producción de lípidos y compuestos de valor agregado. *N. vigensis* ha sido descrita como una microalga dulceacuícola con capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales. Aunque la información específica sobre esta especie es limitada, estudios del género han demostrado un crecimiento eficiente en condiciones autotróficas y mixotróficas, así como una notable capacidad de acumulación lipídica, características que favorecen su aplicación en la producción de biocombustibles, compuestos bioactivos y biofertilizantes (Borowitzka, 2013; Rodolfi et al., 2009; Mata et al., 2010). Estas propiedades posicionan al género *Neochloris* como un recurso emergente en procesos biotecnológicos sostenibles.

Así mismo, en la agricultura, el género *Neochloris* desempeña un papel potencial como bioestimulante debido a su capacidad de producir diversos metabolitos que promueven el crecimiento vegetal, tales como fitohormonas naturales (auxinas, citoquininas y giberelinas), vitaminas (como complejo B y vitamina K), así como aminoácidos esenciales, péptidos bioactivos y proteínas con propiedades antioxidantes y promotoras del crecimiento (Matos et al., 2017; Safi et al., 2014; Stirk et al., 2013a). En este contexto, los usos y la viabilidad de las aplicaciones de *Neochloris*, ya sea en biorremediación, biofertilizantes, producción de compuestos bioactivos o biocombustibles, dependen en gran medida de las condiciones de cultivo, la escala de producción, la cosecha y la eficiencia, además de que no existen modelos que describan este proceso en la especie. Esta falta de información limita la comprensión de su potencial en aplicaciones de biorremediación y aprovechamiento de nutrientes. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar el crecimiento, la producción de biomasa y la capacidad de remoción de nutrimentos debido a *N. vigensis* en diferentes concentraciones de

inoculante, cultivada en condiciones fotoautotróficas en medio artificial, con la finalidad de optimizar el proceso de producción a gran escala.

Materiales y métodos

Aislamiento de *N. vigensis*

La microalga se aisló a partir de una muestra de agua del río Lerma, comunidad de El Capulín, Salamanca, Guanajuato, México. Las coordenadas de recolección de la muestra fueron 20°16'13.3" N 100°59'05.3" O. El aislamiento de la microalga se realizó por la técnica de diluciones seriadas de 10^{-6} a 10^{-10} (Andersen, 2005; Howhow et al., 1973) en medio de cultivo artificial BBM (Barsanti & Gualtieri, 2014); posteriormente, se incubaron a 30 °C por dos meses hasta observar su crecimiento. Se verificó la presencia de un solo género de microalga mediante observaciones microscópicas.

Identificación molecular de la microalga

La extracción de ADN se realizó utilizando el kit Quick-DNA Fecal/Soil Microbe MiniPrep (Zymo Research, Irvine, CA, USA), siguiendo las instrucciones del fabricante. La calidad e integridad del ADN se evaluaron mediante espectrofotometría (NanoDrop One, Thermo Scientific®, Waltham, MA, USA) y electroforesis en gel de agarosa. La amplificación de la región ITS del ADN ribosomal se llevó a cabo mediante PCR utilizando los oligonucleótidos ITS5 (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3') e ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (White et al., 1990), los cuales se alinearon en los genes 18S y 26S del ADN ribosomal, respectivamente, permitiendo la amplificación de la región ITS (ITS1, 5.8S e ITS2). Los productos de PCR fueron verificados mediante electroforesis en gel de agarosa, purificados y posteriormente secuenciados mediante el método de Sanger utilizando el reactivo BigDye Terminator v3.1 (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). Las secuencias obtenidas fueron editadas y ensambladas para generar una secuencia consenso, la cual fue comparada con secuencias disponibles en la base de datos GenBank mediante el algoritmo BLAST del NCBI.

Inoculación de la microalga en el medio de cultivo

Se realizaron inoculaciones con diferentes concentraciones de *N. vigensis* en un sistema de cultivo microalgal en medio líquido. El experimento se condujo en el Laboratorio de

Fisiología Vegetal del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). El factor de estudio comprendió ocho concentraciones de inóculo ($T_1= 0.00$, $T_2= 0.04$, $T_3= 0.11$, $T_4= 0.15$, $T_5= 0.22$, $T_6= 0.32$, $T_7= 0.43$ y $T_8= 0.54$ g L⁻¹) de *N. vigensis*, en medio de cultivo BBM (Barsanti y Gualtieri, 2014) en matraces Erlenmeyer de 2.0 L (unidad experimental) en condiciones de agitación constante mediante aireación por burbujeo a temperatura ambiente con un fotoperiodo de 12 h con una intensidad promedio de 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Quantum Flux MQ-610 Apogee®) y un diseño experimental completamente al azar (DCA) con tres repeticiones.

Determinación del crecimiento microalgal

El crecimiento microalgal se evaluó cada dos días durante un mes mediante densidad óptica (OD₇₅₀) a 750 nm (Griffiths et al., 2011) en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific® Genesys™). Un análisis de regresión no lineal se realizó utilizando el modelo logístico para cada tratamiento:

$$CC (OD_{750}) = \frac{A}{1 + \beta e^{-c x}}$$

donde: *CC* = carácter de crecimiento obtenido mediante OD750 nm; *A*: máximo crecimiento obtenido; *x* = días después de la inoculación; β = parámetro asociado a la ordenada al origen; *c* = parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento del carácter; *e* = base de logaritmo natural ($e = 2.718281828$).

Determinación de biomasa producida y remoción de nutrimentos

La biomasa producida en cada tratamiento se determinó a los 30 d por diferencia de peso en una estufa de secado (Felisa® FE293-AD). El porcentaje de remoción de nutrimentos (PRN) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$PRN (\%) = 1 - \frac{(C_f)}{(C_i)} \times 100$$

donde: *C_f* = concentración del nutrimento a los 30 d y *C_i* = concentración del nutrimento en el día cero de crecimiento de la microalga.

Al tiempo cero y a los 30 días después de inoculación (DDI), en el sobrenadante se evaluaron las concentraciones de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) por espectrofotometría de absorción atómica (GBC® XplorAA Dual). El potasio (K^+) por espectrofotometría de emisión de flama (Sherwood® M410). Los nitratos (NO_3^-) se cuantificaron mediante el método de nitratación de ácido salicílico a 410 nm, los fosfatos (H_2PO_4^-) se determinaron por reducción de ácido ascórbico a 887 nm y finalmente el boro (B) se evaluó mediante el método de azometina-H a 420 nm por espectrofotometría de luz UV-Vis (Thermo Scientific® Genesys™ 10).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de regresión, análisis de varianza y comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), mediante el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

Resultados

Los primers ITS4/ITS5 permitieron la amplificación de un fragmento de aproximadamente 600-700 pb. El análisis de la secuencia consenso ITS mediante BLAST mostró alta similitud con *Neochloris vigensis* (Figura 3).

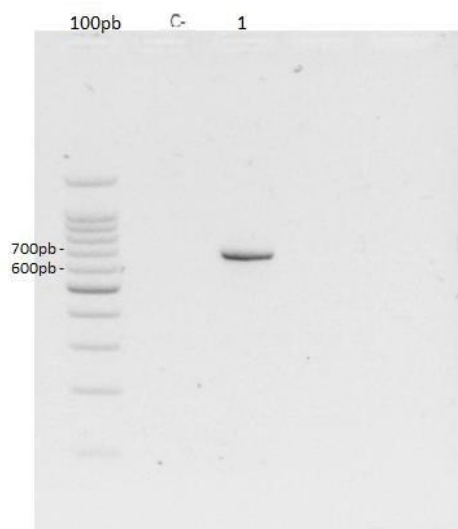


Figura 3. Amplificación del fragmento correspondiente al espacio transcrito interno del DNA ribosomal de 671 pares de bases (bp); 100 pb: marcador de peso molecular 100 pb: C-: control negativo; 1: muestra del amplicón purificado.

El crecimiento de la microalga obtenido por OD₇₅₀ mediante regresión no lineal con un modelo logístico durante 30 d con ocho tratamientos a diferentes concentraciones (0.00 – 0.54 g L⁻¹) mostró una tendencia de crecimiento de biomasa o densidad celular en todos los tratamientos, pero con tasas diferentes; sin embargo, destacó el crecimiento a la concentración del inóculo de 0.43 g L⁻¹ (Figura 4).

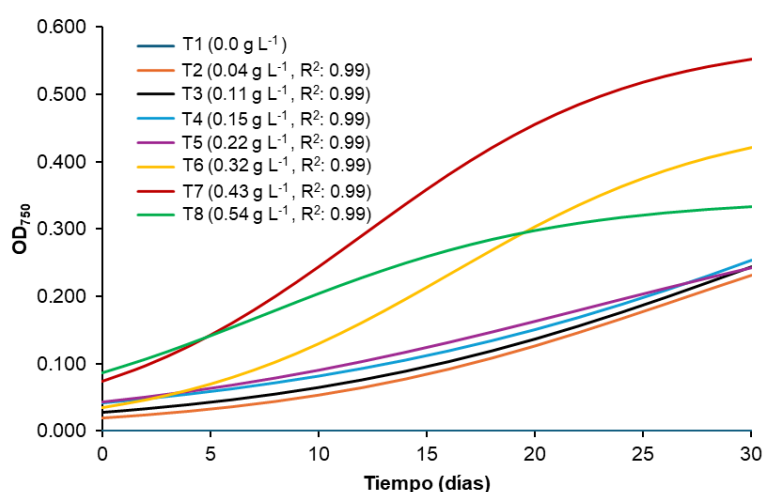


Figura 4. Crecimiento de *Neochloris vigensis* mediante densidad óptica (OD) a 750 nm con variaciones en la concentración de inóculo (g L⁻¹) a los 30 días después de la inoculación (DDI).

Los parámetros del modelo ajustado que describen el crecimiento de *N. vigensis* a diferentes concentraciones de inóculo mostraron diferencias en la velocidad de crecimiento entre tratamientos (Cuadro 1). En todos los tratamientos, el modelo presentó un nivel de ajuste, con valores del coeficiente de determinación (R²) de 0.99, por lo tanto, el modelo permitió explicar prácticamente toda la variabilidad observada durante el crecimiento celular.

Los valores de A (máximo crecimiento obtenido), relacionados con la máxima OD₇₅₀ registrada en el crecimiento mostraron valores crecientes a medida que aumentó la concentración del inóculo. Sin embargo, el T7 (0.43 g L⁻¹) fue el único tratamiento estadísticamente diferente de los restantes (LC 95 %) a excepción del T4. El T8 fue el único tratamiento estadísticamente distinto de todos (LC 95 %) con el valor asociado a la ordenada al origen del modelo ajustado (β) más bajo, es decir, el valor inicial teórico de la OD₇₅₀ en la condición inicial del cultivo, mientras que las mayores velocidades de

crecimiento obtenidas en el experimento se presentaron en los tratamientos 6, 7 y 8. Sin embargo, de acuerdo con los límites de confianza (95 %) estas no fueron estadísticamente diferentes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros asociados con el crecimiento de *Neochloris vigensis* a los 30 d después de la inoculación.

TRA	CON	A	LC (A)		β	LC (B)		C	LC		R^2
			Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx	
T2	0.04	0.39	0.29	0.49	19.12	15.76	22.48	0.11	0.09	0.13	0.99
T3	0.11	0.50	0.33	0.68	17.02	17.03	21.98	0.09	0.08	0.10	0.99
T4	0.15	0.69	0.15	1.24	15.45	4.20	26.70	0.07	0.06	0.09	0.99
T5	0.22	0.37	0.25	0.48	7.39	5.52	9.26	0.09	0.07	0.11	0.99
T6	0.32	0.47	0.43	0.51	12.60	9.70	15.49	0.16	0.13	0.18	0.99
T7	0.43	0.58	0.54	0.62	6.90	5.43	8.36	0.16	0.14	0.19	0.99
T8	0.54	0.35	0.33	0.36	3.00	2.65	3.34	0.15	0.13	0.16	0.99

TRA: tratamiento; CON: concentración de inóculo; A: máximo crecimiento obtenido; β : parámetro asociado a la ordenada al origen; C: velocidad de crecimiento del carácter; LC: límites de confianza a 95 %.

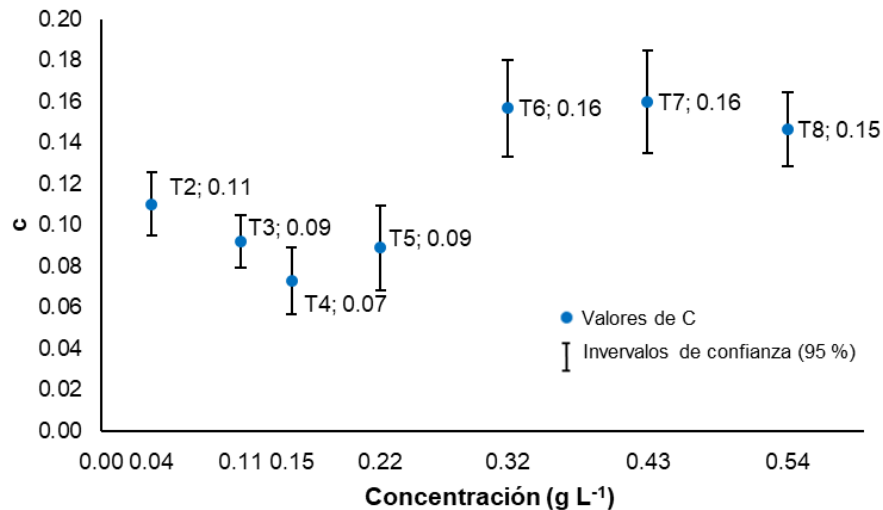


Figura 5. Velocidad de crecimiento (c) de *Neochloris vigensis* con variaciones en la concentración de inóculo (g L⁻¹) a los 30 d después de la inoculación (DDI).

El factor concentración (CON) mostró diferencias significativas ($p \leq 0.01$) sobre todos los caracteres evaluados: biomasa (BM), Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, K⁺, H₂PO₄⁻, Fe, Cu, Zn, Mn y B (Cuadros 2 y 3) a los 30 DDI.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de la biomasa producida y macronutrientes removidos en el medio de cultivo por *Neochloris vigensis*.

FV	GL	BM	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	K ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻
CON	7	0.56 **	294.30 **	3001.08 **	3022.69 **	265.20 **	36.10 **
ERROR	16	0.003	0.66	4.61	8.28	1.36	0.24
TOTAL	23						
CV		6.10	6.20	3.53	6.29	11.88	12.85
MEDIA		0.85	13.10	60.89	45.72	9.81	3.78

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; * Significancia con $p \leq 0.05$, ** significancia con $p \leq 0.01$. Ca²⁺: calcio; Mg²⁺: magnesio; NO₃⁻: nitratos; H₂PO₄⁻: fosfatos; K⁺: potasio.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de los micronutrientes removidos en el medio de cultivo por *Neochloris vigensis*.

FV	GL	Fe	Cu	Zn	Mn	B
CON	7	3356.77 **	3289.77 **	1109.03 **	5788.35 **	19.19 **
ERROR	16	1.55	14.65	4.75	2.84	0.21
TOTAL	23					
CV		2.73	10.80	9.55	2.77	12.20
MEDIA		45.45	35.43	22.82	60.84	3.75

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; * Significancia con $p \leq 0.05$, ** significancia con $p \leq 0.01$. Fe: hierro; Cu: cobre; Zn: zinc; Mn: manganeso; B: boro.

Cuadro 4. Comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) de la biomasa producida (g L⁻¹) y remoción (%) de macronutrientes con variaciones en la concentración de inóculo (g L⁻¹) de *Neochloris vigensis*.

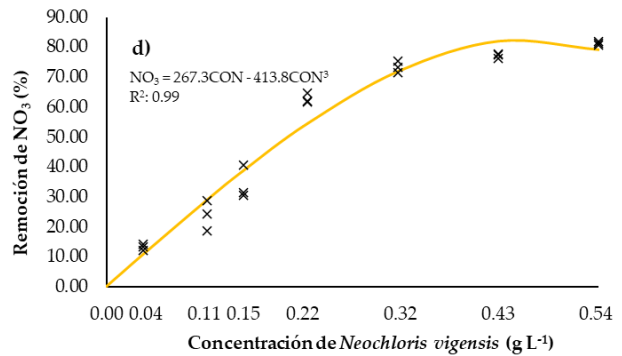
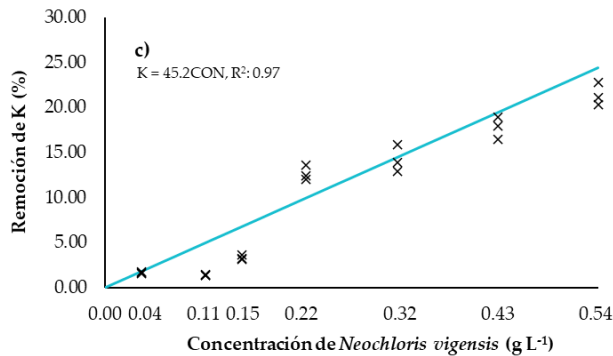
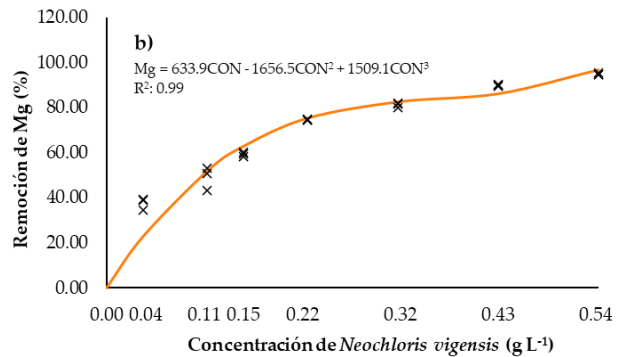
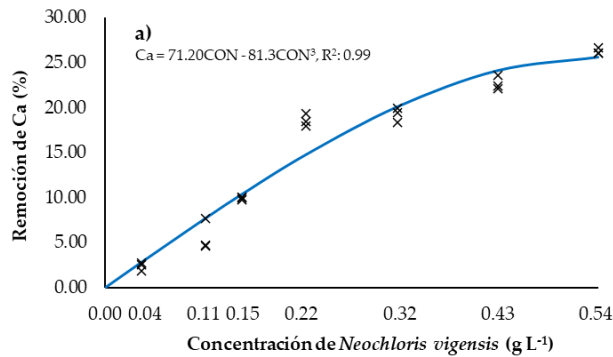
TRAT	CON	BM	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺
T1	0.00	0.00 e	0.00 g	0.00 g	0.00 f	0.00 e	0.00 e
T2	0.04	0.49 d	2.37 f	37.63 f	13.20 e	0.59 de	1.53 de
T3	0.11	0.80 c	5.67 e	49.11 e	23.99 d	0.94 de	1.35 de
T4	0.15	0.97 b	9.93 d	59.46 d	34.16 c	1.73 d	3.3 d
T5	0.22	1.01 b	18.59 c	74.74 c	62.74 b	4.30 c	13.3 c
T6	0.32	1.07 b	19.25 c	81.17 b	73.33 a	5.86 b	15.9 bc
T7	0.43	1.40 a	22.72 b	89.98 a	77.12 a	8.53 a	18.8 b
T8	0.54	1.08 b	26.30 a	95.01 a	81.24 a	8.28 a	24.3 a
DMSH		0.15	2.30	6.07	8.14	1.37	3.29

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; TRAT: tratamiento; CON: concentración de inóculo; BM: biomasa producida; Ca²⁺: calcio; Mg²⁺: magnesio; NO₃⁻: nitratos; H₂PO₄⁻: fosfatos; K⁺: potasio. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 5. Comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) del porcentaje de remoción de micronutrientes con diferentes concentraciones de inóculo (g L^{-1}) de *Neochloris vigensis*.

TRAT	CON	Fe	Cu	Zn	Mn	B
T1	0.00	0.00 g	0.00 e	0.00 f	0.00 e	0.00 e
T2	0.04	6.96 f	3.73 e	4.21 ef	11.52 d	0.41 e
T3	0.11	23.88 e	9.45 e	8.92 de	28.73 c	2.52 d
T4	0.15	34.66 d	20.73 d	14.81 d	46.43 b	3.91 c
T5	0.22	59.87 c	32.09 c	22.91 c	100.00 a	4.98 bc
T6	0.32	74.84 b	56.80 b	34.87 b	100.00 a	5.59 ab
T7	0.43	80.18 a	76.45 a	46.66 a	100.00 a	6.29 a
T8	0.54	83.21 a	84.16 a	50.20 a	100.00 a	6.33 a
DMSH		3.51	10.82	6.16	4.77	1.29

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; TRAT: tratamiento; CON: concentración de inóculo; Fe: hierro; Cu: cobre; Zn: zinc; Mn: manganeso; B: boro; medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).



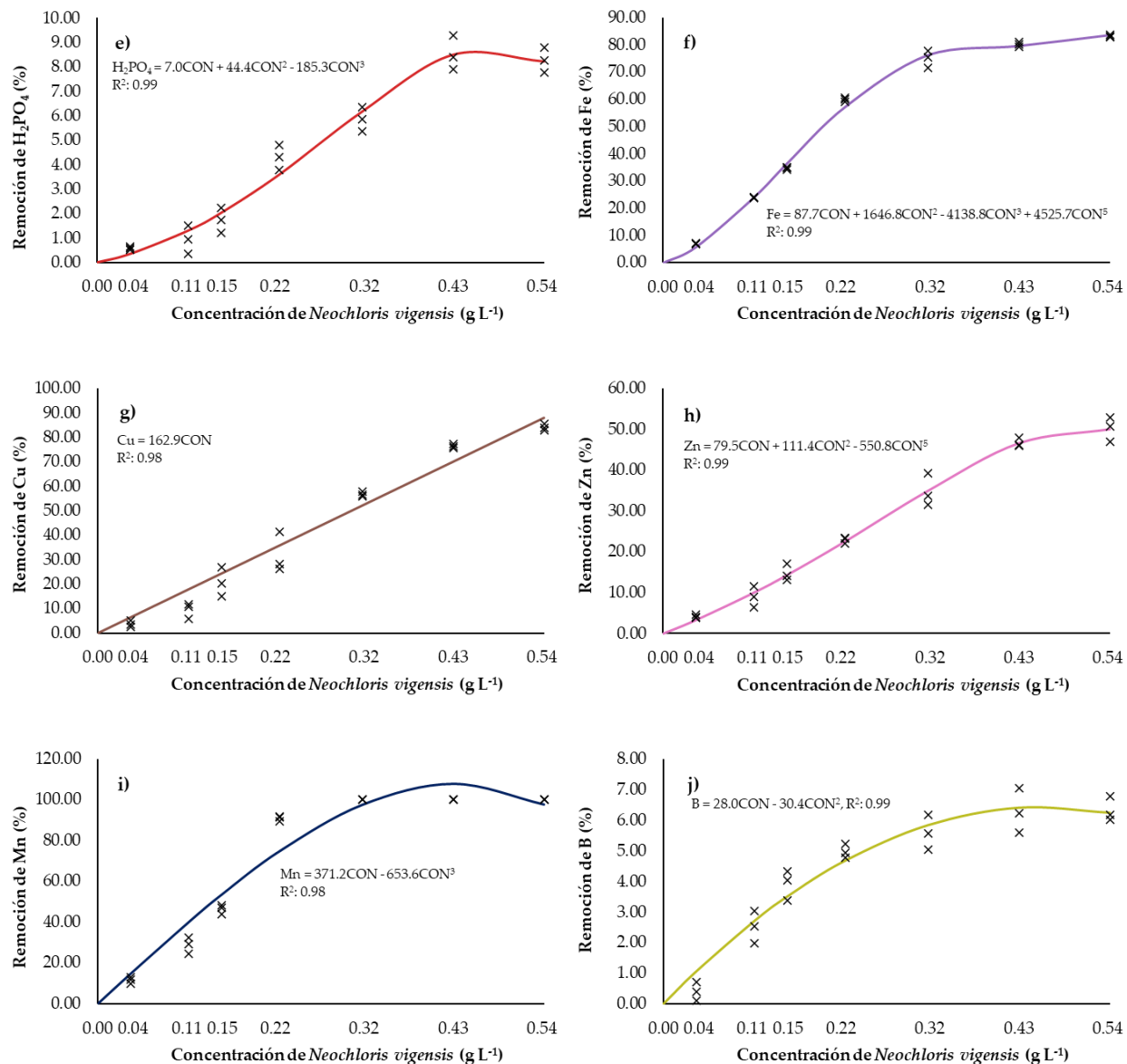


Figura 6. Modelos de regresión de los porcentajes de remoción de nutrientes ante variaciones en la concentración de *Neochloris vigensis* a) calcio; b) magnesio; c) potasio; d) nitratos; e) fosfatos; f) hierro; g) cobre; h) zinc; i) manganeso; j) boro. Los coeficientes de todos los modelos de regresión presentados son estadísticamente diferentes de cero ($p \leq 0.05$).

Discusión

En todos los tratamientos (T1 aT8), el crecimiento de *N. vigensis* a los 30 d después de la inoculación (DDI) mostraron una fase exponencial y una desaceleración progresiva de la OD₇₅₀, lo cual coincide con las fases de crecimiento de las microalgas propuesto por Lee y Shen (2004) y Romo Piñera (2002). Las concentraciones de inóculo más bajas

(0.04 – 0.11 g L⁻¹) presentaron una menor OD₇₅₀ a los 30 d, lo que indicó que requieren mayor tiempo para alcanzar la fase exponencial, mientras que las inoculaciones que tuvieron mejor desempeño fueron las más altas 0.32, 0.43 y 0.54 g L⁻¹ (T6, T7 y T8, respectivamente), con una OD₇₅₀ superior a los demás tratamientos, lo que mostró una mayor densidad celular con respecto a los días; además de que la velocidad de crecimiento (c) de la microalga en estas concentraciones fue significativamente diferente (LC 95 %).

El T7 (0.43 g L⁻¹) produjo la máxima densidad óptica y la máxima producción de biomasa (BM), superior al tratamiento 8 (0.54 g L⁻¹). Este comportamiento indicó un efecto de auto sombreado, lo que generó una limitación en el crecimiento a altas concentraciones celulares (Richmond & Hu, 2013; Ugwu et al., 2008), más que un efecto directo de la concentración del inóculo. Adicionalmente, la limitación de nutrientes en el medio de cultivo puede influir en la conversión de nutrientes a biomasa, el manganeso fue un nutriente clave, debido a su participación directa en la fotólisis de agua y mantenimiento del flujo de electrones durante la fotosíntesis (Barber, 2016; Umena et al., 2011). En conjunto, estos resultados parecen indicar que la disponibilidad de manganeso fue un factor determinante en la reducción de la eficiencia fotosintética en condiciones fotoautotróficas.

Existe una relación positiva entre la concentración de inóculo y la remoción de nutrientes del medio de cultivo. De acuerdo con el porcentaje de remoción se agrupó en tres categorías: baja remoción (<10 %), conformado por H₂PO₄⁻ (8.28 %) y B (6.33 %); remoción intermedia (20 – 50 %) conformado por Zn (50.2 %), Ca²⁺ (26.30 %) y K⁺ (24.30 %) y remoción alta (>80 %) conformado por Mn (100 %), Mg²⁺ (95.01 %), Cu (84.16 %), Fe (83.21 %) y NO₃⁻ (81.24 %) relacionados con procesos fotosintéticos y síntesis proteica (Bloom, 2015; Taiz et al., 2015; Umena et al., 2011). Se infiere que la tendencia de remoción (> 80 %) puede estar relacionada con la función del nutriente en la fisiología de la microalga. El manganeso, completamente removido (100%), es componente estructural del complejo liberador de oxígeno del fotosistema II (Umena et al., 2011); el magnesio es el átomo central de la clorofila (Taiz et al., 2015); el hierro y el cobre participan en el transporte de electrones (citocromos y plastocianina) (Raven et al.,

1999; Yruela, 2013), mientras que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas (Bloom, 2015). La alta remoción de estos nutrientes indica que, a mayor concentración celular, el cultivo prioriza el mantenimiento y funcionamiento de la fotosíntesis. La remoción intermedia de Zn (50.2 %), Ca (26.3 %) y K (24.3 %) puede asociarse con su función en procesos regulatorios y estructurales, tales como la actividad de la anhidrasa carbónica, importante es la asimilación de carbono dependiente de Zn (Moroney & Ynalvez, 2007; Yruela, 2009), la estabilización del fotosistema II mediada y función estructural por Ca^{2+} (Hochmal et al., 2015; Umena et al., 2011) y el papel osmótico y enzimático del K^+ (Marschner, 2012; Sardans et al., 2021).

Adicionalmente, los modelos de regresión permitieron describir la relación entre la concentración de inóculo y la remoción de nutrientes del medio de cultivo, con tendencias diferenciadas para cada nutriente evaluado. Los modelos de regresión presentaron altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0.97\text{--}0.99$), por lo tanto, la concentración de inóculo explica en gran parte la variabilidad observada en la remoción de nutrientes. Se identificaron distintos modelos de regresión según el nutriente evaluado, incluyendo respuestas proporcionales (K^+ , Cu), incrementos con tendencia a la estabilización (Mg, Fe, Zn y NO_3^-) y comportamientos no lineales con tendencia a un máximo (Mn, B y H_2PO_4^-), estas diferencias permiten explicar la existencia de posibles mecanismos de regulación fisiológica o limitaciones en etapas avanzadas del cultivo. Estos resultados indican que la remoción de nutrientes en *N. vigensis* no sigue un comportamiento uniforme, sino que depende de la función fisiológica de cada nutriente y de la densidad celular. En este sentido, el uso de modelos de regresión representa una herramienta útil para describir y predecir la dinámica de remoción bajo condiciones fotoautotróficas.

Asimismo, diversos estudios han demostrado que géneros como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina* presentan alta capacidad para la remoción de nutrientes, principalmente compuestos nitrogenados y fosfatados, así como de algunos metales, entre ellos Zn, Cu y Mn, en condiciones autotróficas. En *Chlorella* sp., se ha reportado una remoción de hasta 81 % para nitratos y fosfatos (Haro et al., 2015), lo cual coincide con los valores obtenidos en el presente estudio para nitratos (81.24 %); sin embargo, no se observó una

tendencia similar en la remoción de fosfatos (H_2PO_4^-), la cual fue de 8.28 %. Para metales, se han documentado diferencias en las eficiencias de remoción dependiendo de la especie y las condiciones de cultivo. Al respecto, en *Chlorella* sp., Chan et al. (2013) reportaron porcentajes de remoción de 0.70 – 94.10 % para Zn y de 69.90 – 81.70 % para Cu, mientras que Kumar et al. (2015) registraron 6.60 % para Zn y 71.00 % para Cu. En el presente estudio, *N. vigensis* mostró una remoción de 50.2 % para Zn y 84.16 % para Cu. En relación con el Mn, la remoción observada en este trabajo (100 %) fue superior a la reportada previamente en otras microalgas, donde se han documentado eficiencias cercanas a 40.41 % (Şentürk y Yıldız, 2016). Estas diferencias pueden atribuirse a la cepa utilizada y a las condiciones de cultivo (Chan et al., 2013). Asimismo, la capacidad de eliminación de metales por microalgas ha sido ampliamente asociada a la composición de la pared celular, debido a que sus componentes contienen diversos grupos funcionales como carboxilo, hidroxilo, amino y fosfato, responsables de la interacción y retención de iones metálicos mediante procesos de biosorción (Davis et al., 2003; Gadd, 2009).

En contraste, la baja remoción de B (6.33 %) y del H_2PO_4^- (8.28 %) podría explicarse con base en las condiciones experimentales del cultivo fotoautotrófico, en medio de cultivo BBM, estos nutrientes no constituyeron un factor limitante para el crecimiento celular de *N. vigensis* a pesar del papel del boro con su función estructural en pared celular (Marschner, 2012) y la función central del fósforo en la síntesis de ATP, ácidos nucleicos y fosfolípidos de membrana (Klausmeier et al., 2004; Raghothama, 1999; Taiz et al., 2015). Por otro lado, en condiciones donde el fósforo es suficiente, el crecimiento microalgal puede estar regulado por otros factores como el nitrógeno, la luz o el carbono inorgánico (Tilman, 1982). En el presente estudio, la baja remoción de H_2PO_4^- , en conjunto con mayores niveles de remoción observados para otros nutrientes como NO_3^- , Mg^{2+} , Fe, Cu y Mn, se explica a través de una mayor demanda relativa de estos nutrientes. Sin embargo, el hecho de que no se observara un incremento proporcional en la biomasa en el tratamiento de mayor concentración (0.54 g L^{-1}) indica que el crecimiento no estuvo únicamente determinado por la disponibilidad de fósforo. En este sentido, es posible que micronutrientes como el Mn hayan influido en la regulación del crecimiento en condiciones fotoautotróficas.

Los resultados obtenidos en la producción de biomasa y la remoción de nutrientes bajo condiciones fotoautotróficas en medio de cultivo BBM indican que, a mayor concentración de inóculo, se incrementa la demanda inicial de nutrientes y, en consecuencia, su remoción; sin embargo, este aumento no se traduce en una mayor producción de biomasa. Droop (1974) demostró que el crecimiento celular depende de la cuota interna de nutrientes, más que de la tasa de absorción externa, por lo que las células pueden continuar absorbiendo nutrientes sin que ello implique un incremento proporcional en la tasa de crecimiento.

Con base en estos resultados, es posible agrupar las concentraciones de inóculo de *N. vigensis* en tres intervalos: (a) baja remoción, caracterizado por menor densidad celular y, por ende, baja remoción de nutrientes; (b) intervalo óptimo, con una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mayor remoción y producción de biomasa; y (c) un intervalo alto, donde se presenta una elevada remoción de nutrientes, pero sin un incremento proporcional en la biomasa, lo que sugiere posibles limitaciones asociadas a la disponibilidad de luz o a procesos de auto-sombreamiento celular.

Conclusiones

La mayor producción de biomasa se obtuvo con la concentración de 0.43 g L^{-1} de inóculo de *Neochloris vigensis*. La eficiencia en la remoción de nutrientes siguió el siguiente orden: $\text{Mn} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{NO}_3 > \text{Zn} > \text{Ca} > \text{K} > \text{H}_2\text{PO}_4 > \text{B}$ con 100, 89.98, 80.18, 77.12, 76.45, 46.66, 22.72, 18.80, 8.53 y 6.29 %, respectivamente. La inoculación con 0.43 g L^{-1} de *N. vigensis* en condiciones fotoautotróficas en laboratorio podría contribuir al tratamiento de sitios contaminados principalmente por Mn, Mg, Fe, Cu y NO_3 , así como a la maximización de la producción de biomasa con potencial de aplicación en la agricultura.

Literatura citada

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Andersen, R. A. (2005). *Algal culturing techniques*. Elsevier Academic Press.

- Barber, J. (2012). Photosystem II: The water-splitting enzyme of photosynthesis. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 77, 295–307. <https://doi.org/10.1101/sqb.2012.77.014472>
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology* (2nd ed.). CRC Press.
- Beijerinck, M. W. (1890). Culture de l'algue verte *Chlorella vulgaris*. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 23, 369–400.
- Bellinger, E. G., & Sigee, D. C. (2015). *Freshwater algae: Identification, enumeration and use as bioindicators*. John Wiley & Sons.
- Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae—Their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Bloom, A. J. (2015). The increasing importance of distinguishing among plant nitrogen sources. *Current Opinion in Plant Biology*, 25, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.03.002>
- Bock, C., Krienitz, L., & Pröschold, T. (2011). Taxonomic reassessment of the genus *Chlorella* (Trebouxiophyceae) using molecular signatures (barcodes), including description of seven new species. *Fottea*, 11(2), 293–312. <https://doi.org/10.5507/fot.2011.026>
- Boenigk, J., et al. (2020). *Chlorella thermophila*, a new thermotolerant species of *Chlorella*. *Microbiology*, 89(6), 610–620. <https://doi.org/10.1134/S0026261720060107>
- Chan, A., Salsali, H., & McBean, E. (2013). Heavy metal removal (copper and zinc) in secondary effluent from wastewater treatment plants by microalgae. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(2), 130–137. <https://doi.org/10.1021/sc400289z>
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., & Chang, J.-S. (2017). Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology*, 229, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

- Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R. W., & Das, K. C. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology*, 101, 3097–3105.
- Davis, T. A., Volesky, B., & Mucci, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37(18), 4311–4330. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00293-8)
- Droop, M. R. (1974). The nutrient status of algal cells in continuous culture. *Journal of Phycology*, 10(3), 264–272.
- Gadd, G. M. (2009). Biosorption: Critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(1), 13–28. <https://doi.org/10.1002/jctb.1999>
- Gómez Luna, L. M. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19(2), 3–20.
- Griffiths, M. J., Garcin, C., Van Hille, R. P., & Harrison, S. T. L. (2011). Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. *Journal of Microbiological Methods*, 85(2), 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.02.005>
- Haro, S., & Perales, J. A. (2015). Cinética de consumo de nutrientes y crecimiento de un bloom de microalgas en un fotobiorreactor high rate algae pond (HRAP). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(2), 15–31.
- Hernández, A., & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(1), 157–173.
- Hochmal, A. K., Schulze, S., Trompelt, K., & Hippler, M. (2015). Calcium-dependent regulation of photosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1847(9), 993–1003. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2015.02.010>
- Howarth, R., & Rosowaki, J. (1973). Methods for microscopic algae. *Experientia*, 49, 825–829.
- Kuo, C.-M., Sun, Y.-L., Lin, C.-H., Lin, C.-H., Wu, H.-T., & Lin, C.-S. (2021). Cultivation and biorefinery of microalgae (*Chlorella* sp.) for producing biofuels and other byproducts: A review. *Sustainability*, 13(23), Article 13480. <https://doi.org/10.3390/su132313480>

- Kumar, D., Santhanam, S. P., Jayalakshmi, T., et al. (2015). Excessive nutrients and heavy metals are removed from diverse wastewater using marine microalga *Chlorella marina* (Butcher). *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 44(1), 97–103.
- Klausmeier, C. A., Litchman, E., Daufresne, T., & Levin, S. A. (2004). Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*, 429(6988), 171–174.
- Lee, Y.-K., & Shen, H. (Eds.). (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Publishing.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Markou, G., & Georgakakis, D. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (*Spirulina*) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy*, 88(10), 3389–3401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.042>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Matos, Â. P. (2017). The impact of microalgae in food science and technology. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(11), 1333–1350. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-3050-7>
- Moroney, J. V., & Ynalvez, R. A. (2007). Proposed carbon dioxide concentrating mechanism in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eukaryotic Cell*, 6(8), 1251–1259. <https://doi.org/10.1128/EC.00064-07>
- Morais, M. G., Vaz, B. D. S., Morais, E. G., & Costa, J. A. V. (2021). Biologically active metabolites synthesized by microalgae. *BioMed Research International*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/6646825>
- Plaza, M., Herrero, M., Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2008). Innovative natural functional ingredients from microalgae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(16), 7159–7170. <https://doi.org/10.1021/jf800808w>
- Raghothama, K. G. (1999). Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 665–693. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.665>

- Rani, K., Sandal, N., & Sahoo, P. (2018). A comprehensive review on *Chlorella*: Its composition, health benefits, market and regulatory scenario. *The Pharma Innovation Journal*, 7(7), 584–589.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science.
- Richmond, A., & Hu, Q. (2013). *Handbook of microalgal culture: Applied phycology and biotechnology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Rodolfi, L., Zittelli, G. C., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G., & Tredici, M. R. (2009). Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation. *Biotechnology and Bioengineering*, 102(1), 100–112. <https://doi.org/10.1002/bit.22033>
- Romo Piñera, A. (2002). *Manual para el cultivo de microalgas*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Safi, C., Charton, M., Pignolet, O., Silvestre, F., Vaca-García, C., & Pontalier, P.-Y. (2013). Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors. *Journal of Applied Phycology*, 25, 523–529.
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P. Y., & Vaca-García, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>
- Salazar, M. (2005). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- Sánchez-Bayo, A., López-Muñoz, I., & Morales-Sánchez, D. (2022). Microalgas con interés comercial: Aplicaciones biotecnológicas en agricultura y biorremediación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 45–62. <https://doi.org/10.25127/raa.v13i2.9052882>
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. *Plants*, 10(2), Article 419. <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
- SAS Institute Inc. (2013). *SAS/STAT® 9.4 user's guide*. SAS Institute Inc.

- Schirrmeister, B. E., Antonelli, A., & Bagheri, H. C. (2011). The origin of multicellularity in cyanobacteria. *BMC Evolutionary Biology*, 11, Article 45.
- Shihira, I., & Krauss, R. W. (1965). *Chlorella sorokiniana*, sp. nov. *Journal of Phycology*, 1(1), 30–38. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1965.tb04523.x>
- Song, H., Hu, Z., & Liu, G. (2023). Assessing advances in taxonomic research on Chlorellaceae (Chlorophyta). *Biodiversity Science*, 31(2), Article 22083. <https://doi.org/10.17520/biods.2022083>
- Stirk, W. A., Bálint, P., Tarkowská, D., Novák, O., Maróti, G., Ljung, K., Turečová, V., Strnad, M., & van Staden, J. (2013a). Hormone profiles in microalgae: Gibberellins and brassinosteroids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.037>
- Stirk, W. A., Ördög, V., Novák, O., Rolčík, J., Strnad, M., Bálint, P., & van Staden, J. (2013b). Auxin and cytokinin relationships in 24 microalgal strains. *Journal of Phycology*, 49(3), 459–467. <https://doi.org/10.1111/jpy.12059>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tilman, D. (1982). *Resource competition and community structure*. Princeton University Press.
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99(10), 4021–4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>
- Umena, Y., Kawakami, K., Shen, J.-R., & Kamiya, N. (2011). Crystal structure of oxygen-evolving photosystem II at a resolution of 1.9 Å. *Nature*, 473(7345), 55–60. <https://doi.org/10.1038/nature09913>
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky & T. J. White (Eds.), *PCR protocols: A guide to methods and applications* (pp. 315–322). Academic Press.
- Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2010). An outlook on microalgal biofuels. *Science*, 329(5993), 796–799. <https://doi.org/10.1126/science.1189003>

- Wink, M. (2010). Introduction: Biochemistry, physiology and ecological functions of secondary metabolites. In M. Wink (Ed.), *Biochemistry of plant secondary metabolism* (2nd ed., pp. 1–19). Springer.
<https://doi.org/10.1002/9781444320503.ch1>
- Xu, H., Miao, X., & Wu, Q. (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*, 126, 499–507.
- Yruela, I. (2013). Transition metals in plant photosynthesis. *Metallomics*, 5(9), 1090–1109.
<https://doi.org/10.1039/c3mt00086a>
- Yruela, I. (2009). Copper in plants: Acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36(5), 409–430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>
- Şentürk, T., & Yıldız, Ş. (2016). Adsorbent effect of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus* sp. (Chlorophyta) for the removal of some heavy metals and nutrients. *Turkish Journal of Biochemistry*, 41(1), 87–95. <https://doi.org/10.1515/tjb-2016-0015>

CAPÍTULO 4. Efecto bioestimulante de la concentración de *Neochloris vigensis* Archibald sobre el crecimiento y la dinámica nutrimental en *Solanum lycopersicum* L.

Resumen

Las microalgas han sido ampliamente estudiadas por su potencial como bioestimulantes en sistemas agrícolas debido a su capacidad para influir en el crecimiento vegetal y la dinámica nutrimental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de *Neochloris vigensis* sobre el crecimiento y la dinámica nutrimental en genotipos de *Solanum lycopersicum* L. bajo condiciones de balsa flotante. Se evaluaron tres genotipos de tomate bajo cuatro concentraciones de *N. vigensis* (0.00, 0.10, 0.21 y 0.42 g L⁻¹) en un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial. Se determinaron variables de crecimiento, acumulación de nutrientes en distintos órganos de la planta, así como el balance parcial (PB) y la eficiencia de utilización interna (EI). Los resultados mostraron que la concentración de 0.42 g L⁻¹ incrementó significativamente la biomasa, la acumulación nutrimental y el balance parcial de nutrientes en comparación con los demás tratamientos. La eficiencia de utilización interna se mantuvo relativamente estable para la mayoría de los nutrientes, aunque se observaron variaciones en micronutrientes específicos como Zn, Mn y B. En conjunto, los resultados indican que el efecto bioestimulante de *N. vigensis* se asocia principalmente con una mayor captación y acumulación de nutrientes, lo cual se traduce en un incremento en el crecimiento vegetal y en cambios en la eficiencia de uso de micronutrientes.

Palabras clave: absorción nutrimental, biomasa, cultivo hidropónico, eficiencia nutrimental, tomate.

Sometido a: No sometido a ninguna revista

Estado: No publicado

Introducción

La creciente necesidad de reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos y plaguicidas ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en la producción agrícola. En este contexto, resulta fundamental comprender las interacciones mutualistas que se establecen entre las raíces de las plantas y la microbiota de la rizosfera, ya que su aprovechamiento permite avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles y seguros. Por ello, las investigaciones actuales se han enfocado en evaluar la diversidad genética y bioquímica de los microorganismos rizosféricos, así como su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfatos, aportar nutrimentos y producir fitohormonas y compuestos quelantes de hierro (Bajic & Sánchez, 2020). Asimismo, la selección de microorganismos eficientes requiere evaluaciones en condiciones controladas de laboratorio, invernadero y campo, con el fin de identificar cepas con mayor capacidad de promover el crecimiento vegetal y de utilizarse como inoculantes microbianos de bajo costo (O'Callaghan, 2022).

En este contexto, los bioestimulantes han surgido como una estrategia prometedora para mejorar la productividad agrícola. De acuerdo con el Reglamento (UE) 2019/1009 (2019), un bioestimulante se define como una sustancia o microorganismo que estimula los procesos de nutrición de las plantas, independientemente de su contenido nutrimental, y tiene como objetivo de los bioestimulantes es mejorar la eficiencia en el uso de nutrimentos (Rosolem et al., 2024), la tolerancia al estrés abiótico, la calidad del cultivo o la disponibilidad de nutrimentos en la rizósfera. En esta categoría se incluyen sustancias húmicas, aminoácidos, extractos de algas, compuestos nitrogenados, quitosano, así como bacterias y hongos benéficos (Du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2020a). Los bioestimulantes pueden aplicarse por vía foliar, edáfica o directamente sobre semillas, raíces y hojas, actuando como promotores del crecimiento vegetal y como moduladores de la dinámica nutrimental (Calvo et al., 2014; Dehkordi et al., 2021; Rouphael et al., 2017).

Particularmente, las microalgas han sido reconocidas como una fuente potencial de bioestimulantes debido a su capacidad de producir compuestos bioactivos que influyen en procesos fisiológicos clave, como la absorción y utilización de nutrimentos (Rouphael

& Colla, 2020b). Su aplicación en sistemas agrícolas ha demostrado efectos positivos en el crecimiento vegetal y en la dinámica nutrimental, especialmente en condiciones donde la disponibilidad de nutrimentos es un factor limitante o donde se busca optimizar su aprovechamiento. Dentro de este grupo, el género *Neochloris* ha despertado interés biotecnológico por su capacidad de generar biomasa y compuestos asociados al metabolismo vegetal. Sin embargo, la información sobre el efecto de *Neochloris vigensis* en cultivos agrícolas es limitada, particularmente en relación con su impacto sobre la dinámica nutrimental y la eficiencia de uso de nutrimentos. Además, en sistemas hidropónicos como la balsa flotante, donde los nutrimentos se encuentran en solución y su disponibilidad es alta, resulta relevante evaluar si la aplicación de suspensiones de la microalga *N. vigensis* puede modificar la captación y utilización de nutrimentos por la planta (Savvas & Gruda, 2018). En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de *N. vigensis* sobre el crecimiento, la acumulación de nutrimentos y la eficiencia de uso de nutrimentos en genotipos de *Solanum lycopersicum* L. en condiciones de balsa flotante.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en un invernadero de tecnología media del Instituto de Horticultura ubicado en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). El sistema de producción se realizó en cultivo mediante balsa flotante con placas de poliestireno hasta los 25 días después del trasplante (DDT) en solución nutritiva $\text{NH}_4^+ = 0.75$; $\text{Ca}^{2+} = 3.78$; $\text{Mg}^{2+} = 2.34$; $\text{K}^+ = 3.17$; $\text{NO}_3^- = 6.26$; $\text{SO}_4^{2-} = 3.20$; $\text{H}_2\text{PO}_4^- = 0.54$ mEq L^{-1} , respectivamente y $\text{Fe} = 1.82$; $\text{Cu} = 0.10$; $\text{Zn} = 0.24$; $\text{Mn} = 0.60$; $\text{Mo} = 0.05$ mg L^{-1} . Los factores de estudio fueron tres genotipos de tomate (El CID, Harris Moran®; Aguamiel, Vilmorin® y 52/47S8, proveniente del mejoramiento genético de tomate de la UACH). Se emplearon cuatro concentraciones de *Neochloris vigensis* (FP01; número de acceso PZ323027): 0, 0.10, 0.21 y 0.42 g L^{-1} . *N. vigensis* fue cultivada en medio de cultivo BBM (Barsanti & Gualtieri, 2014) en condiciones de agitación constante mediante aireación por burbujeo a temperatura ambiente con un fotoperiodo de 12 h con una intensidad promedio de 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (MQ-610, Apogee Instruments, Logan, UT, USA). La suspensión de *N. vigensis* fue caracterizada mediante la determinación del perfil de aminoácidos. El análisis se realizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), previa

hidrólisis ácida con HCl 6N, se identificaron los aminoácidos ácido aspártico, ácido glutámico, serina, histidina, glicina, treonina, arginina, alanina, tirosina, valina, fenilalanina, isoleucina, leucina, lisina y prolina.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con arreglo factorial completo, con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en cinco plantas de tomate cosechadas a los 25 días después del trasplante (DDT). Los tratamientos se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Tratamientos evaluados en función del genotipo y la concentración de *Neochloris vigensis*.

Tratamiento	Genotipo	Concentración de <i>N. vigensis</i> (g L ⁻¹)
T1	El CID	0.00
T2	Aguamiel	0.00
T3	52/47S8	0.00
T4	El CID	0.10
T5	Aguamiel	0.10
T6	52/47S8	0.10
T7	El CID	0.21
T8	Aguamiel	0.21
T9	52/47S8	0.21
T10	El CID	0.42
T11	Aguamiel	0.42
T12	52/47S8	0.42

Los caracteres evaluados fueron: peso seco de raíz (PSR, g planta⁻¹), materia fresca (MF, g planta⁻¹), materia seca (MS, g planta⁻¹) en una balanza (E1B120, Ohaus, Parsippany, NJ, USA), longitud de raíz (LR, cm), altura de la planta (AP, cm), diámetro de tallo (DT, cm), área foliar (AF, cm² planta⁻¹) mediante el software ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA), volumen de raíz (VR, cm³) mediante el método de desplazamiento de agua en una probeta graduada (Böhm, 1979), registrando la diferencia entre el volumen inicial y final del agua al introducir el sistema radical y porcentaje de raíces medias (RM, %), finas (RF, %) y muy finas (RMF, %) basado en la escala propuesta por Gutiérrez Castorena (2024), relación MS/PSR mediante el

coeficiente de materia seca (g) entre el peso seco de raíz (g), clorofila total (ChlT, mg 100 g⁻¹ P.F.) y carotenoides (Car, mg 100 g⁻¹ P.F.) de acuerdo con la metodología descrita por Lichtenthaler & Buschmann (2001).

Para la altura de la planta (AP) (a los 1, 8, 15, 21 y 25 DDT) se realizó un análisis de regresión no lineal con el modelo exponencial para cada tratamiento:

$$CC (AP) = \beta e^{c \cdot x}$$

donde: *CC* = caracter de crecimiento; *x* = días después del trasplante; β = parámetro asociado a la ordenada al origen; *c* = parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento del carácter; *e* = base de logaritmo natural (*e* = 2.718281828).

Se realizó el análisis nutrimental en raíz, tallo y hoja a los 25 DDT, mediante digestión con mezcla diácida relación 4:1 (ácido sulfúrico: ácido perclórico). Para ello el material vegetal se secó en un horno de secado (FE-293AD, Felisa, Zapopan, Jalisco, México) a 65°C durante 72 h y posteriormente las muestras se trituraron en un molino de acero inoxidable (ED-5, Thomas Wiley Mill, Philadelphia, PA, USA).

El nitrógeno (N) se determinó por arrastre de vapor Kjeldahl y valorado con ácido sulfúrico estandarizado con carbonato de sodio; el fósforo (P) se cuantificó por desarrollo de color con molibdovanadato de amonio en un espectrofotómetro de luz UV-Vis (Genesys 150, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) a 410 nm; el sodio (Na) y potasio (K) en un espectrofotómetro de emisión de flama (M410, Sherwood Scientific, Cambridge, UK); calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) con un espectrofotómetro de absorción atómica (XplorAA Dual, GBC Scientific Equipment, Melbourne, Victoria, Australia) y el boro por desarrollo de color con azometina-H en un espectrofotómetro de luz UV-Vis (Genesys 150, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) a 420 nm.

Los resultados fueron calculados en base a materia seca y de acuerdo con las siguientes fórmulas y se expresaron en porcentaje (%) para N, P, K, Ca, Mg y Na y en miligramos por kilogramo (mg kg⁻¹) para Fe, Cu, Zn, Mn y B:

$$N, P, K, Ca, Mg, Na (\%) = \frac{LMN \times Vf}{g \times 10000}$$

$$\text{Fe, Cu, Zn, Mn, B (mg kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{MN} \times \text{Vf}}{\text{g}}$$

donde: LMN = concentración del macronutriente en la muestra (mg L⁻¹); MN = concentración del micronutriente en la muestra; Vf = volumen de aforo de la muestra (mL); g = masa de muestra digestada (g).

A partir de los datos obtenidos del análisis de tejido vegetal se obtuvo el contenido total de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn y B) en biomasa aérea (CN) de la siguiente manera:

$$\text{CN mg planta}^{-1} = \frac{\text{MS} \times (\text{CNt} + \text{CNh})}{100}$$

donde: CN = contenido total del nutriente en la biomasa aérea; MS = materia seca (mg); CNt = contenido total del nutriente en tallo (%); CNh = contenido total del nutriente en hoja (%).

De acuerdo con las ecuaciones propuestas por Quille et al. (2025), se obtuvo el balance parcial de nutrimentos (PB), eficiencia de utilización interna (EI) de la siguiente manera:

$$\text{PB (\%)} = \frac{\text{CN}}{\text{NA}} \times 100$$

donde: CN = contenido total del nutriente en la biomasa aérea (mg planta⁻¹); NA = cantidad del nutriente aplicado (mg)

$$\text{EI} = \frac{\text{MS}}{\text{CN}} \times 100$$

donde: MS = materia seca (mg); CN = contenido total del nutriente en la biomasa aérea (mg planta⁻¹).

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de regresión, correlación de Pearson, análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), mediante el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

Para integrar la respuesta de crecimiento en una sola variable, se elaboró un índice de crecimiento general (ICG) mediante la estandarización de los caracteres asociados al

crecimiento: materia seca (MS), altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT) y área foliar (AF) el cual fue utilizado exclusivamente en análisis de correlación y en el análisis de componentes principales (PCA). Cada variable fue transformada a valores Z mediante la fórmula:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

donde: X= es el valor observado; μ = media y σ = la desviación estándar. El ICG se obtuvo de la siguiente manera:

$$ICG = \frac{Z_{MS} + Z_{AP} + Z_{DT} + Z_{AF}}{4}$$

Resultados y discusión

La altura de la planta (AP) mostró un comportamiento exponencial en todos los tratamientos evaluados y mostró diferencias a partir de los 10 - 15 días después del trasplante DDT (Figura 7), lo que mostró que el efecto de la aplicación de *N. vigensis* no fue inmediato, sino que se manifestó progresivamente durante el desarrollo de la planta. A los 25 DDT, la mayor altura se registró en los tratamientos con la concentración más alta de la suspensión de *N. vigensis* (0.42 g L⁻¹), destacando el genotipo 52/47S8 (T11), seguido por Aguamiel (T10) y EL CID (T12).

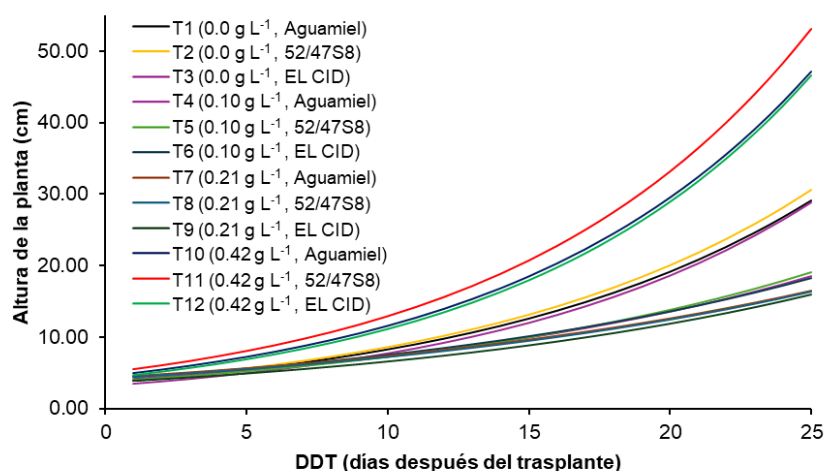


Figura 7. Crecimiento en altura de planta (AP) de *Solanum lycopersicum* L. en respuesta a diferentes concentraciones de suspensión de *Neochloris vigensis*.

En contraste, los genotipos con concentraciones intermedias (0.10 y 0.21 g L⁻¹) presentaron alturas inferiores, incluso a la del testigo (0.00 g L⁻¹), lo cual indicó que la respuesta del cultivo no fue dosis-dependiente. Este comportamiento mostró que las dosis intermedias no fueron suficientes para generar un efecto positivo en el crecimiento o que pudieron limitar temporalmente el crecimiento de la planta.

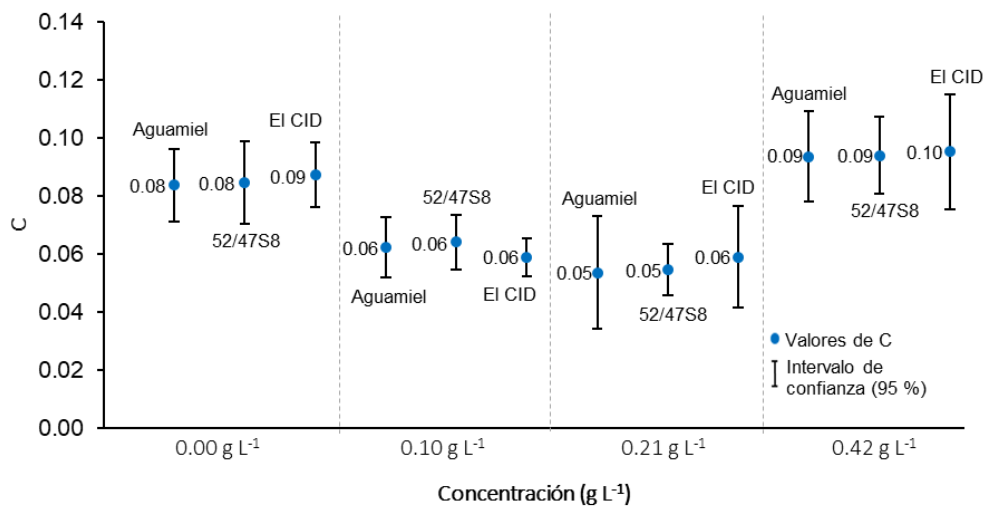


Figura 8. Tasas de crecimiento (c) en altura de planta (AP) durante el crecimiento y desarrollo de *Solanum lycopersicum* L. con y sin suspensión de *Neochloris vigensis*. Barras verticales corresponden al intervalo de confianza (95 %).

El parámetro C, asociado a la tasa de crecimiento (AP), presentó variaciones en función de la concentración de la suspensión de *N. vigensis* y del genotipo evaluado (Figura 8). En los tratamientos sin aplicación de la *N. vigensis* (0.00 g L⁻¹), los valores de C en todos los genotipos obtuvieron valores entre 0.08–0.09. En las concentraciones intermedias (0.10 g L⁻¹ y 0.21 g L⁻¹) se obtuvieron valores más bajos (0.05 - 0.06), mientras que con la concentración más alta (0.42 g L⁻¹) se registraron los valores más altos (0.09 - 0.10). Sin embargo, estos valores no mostraron diferencias estadísticas (IC 95 %), lo que indicó que el efecto de la suspensión de la microalga no se manifestó en la tasa de crecimiento, sino en el crecimiento acumulado, resultando en una mayor altura de la planta (Figura 9).



Figura 9. Diferencias en altura de *Solanum lycopersicum* L. con diferentes suspensiones de *Neochloris vigensis* a los 25 DDT: a) 0.00 g L⁻¹; b) 0.10 g L⁻¹; c) 0.21 g L⁻¹; d) 0.42 g L⁻¹.

El análisis de varianza mostró que la concentración de la suspensión de la microalga *N. vigensis* tuvo efectos significativos ($p \leq 0.05$) en la mayoría de los caracteres asociados al crecimiento, pigmentos y sistema radical de *Solanum lycopersicum* (Cuadro 7), lo que indicó que la respuesta de la planta estuvo determinada principalmente por la dosis aplicada de *N. vigensis*.

En los caracteres de crecimiento, la concentración microalgal presentó efectos significativos en todas las variables evaluadas ($p \leq 0.05$), con excepción de la longitud de raíz (LR), lo que sugiere que el efecto de la suspensión de la microalga se manifestó principalmente en el crecimiento aéreo, más que en el alargamiento radical. Asimismo, el genotipo mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) en variables como materia fresca (MF), materia seca (MS), altura de planta (AP) y área foliar (AF), mientras que la interacción concentración x genotipo fue significativa en MF, MS, AP, DT y AF, lo que indica que al menos una concentración con un genotipo fue estadísticamente diferente a los demás ($p \leq 0.05$).

En los pigmentos, la concentración de la suspensión de la microalga mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) en la clorofila total (ChIT) y carotenoides (Car). Además, la ChIT presentó efectos significativos en el genotipo y en la interacción, mientras que los carotenoides no presentaron efecto por el genotipo, pero sí en la interacción genotipo x concentración ($p \leq 0.05$).

En el sistema radical, la concentración microalgal afectó significativamente el volumen de raíz (VR), raíces finas (RF) y raíces muy finas (RMF), mientras que la proporción de raíces medias (RM) no mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Por su parte, el genotipo y la interacción concentración x genotipo influyeron significativamente en RM, RF y RMF ($p \leq 0.05$), lo que indica variación en la arquitectura radical y en la respuesta de los genotipos a la suspensión de *N. vigensis*. Los coeficientes de variación fueron aceptables en la mayoría de los caracteres evaluados ($CV < 16\%$), aunque caracteres evaluados como PSR (21.2 %), MS/PSR (24.4 %) y VR (26.8 %) presentaron mayor variabilidad.

Cuadro 7. Cuadrados medios de los caracteres evaluados asociados al crecimiento, sistema radical y pigmentos de *Solanum lycopersicum* L.

FV	CON	BLO(CON)	GEN	CON*GEN	ERROR	TOTAL	CV	MEDIA
GL	3	8	2	6	16	35		
----- Crecimiento -----								
PSR	0.809**	0.016	0.017	0.05*	0.017		21.2	0.6
MF	4760.8**	2.752	113.9**	75**	5.440		11.7	20.0
LR	371.9**	16.96	25.21	67.7	37.22		11.8	51.8
MS	36.8**	0.007	0.888**	0.6**	0.050		10.9	2.0
AP	1739.1**	7.197	65.46**	18.4**	3.00		6.3	27.3
DT	0.415**	0.001	0.003	0.004	0.001		6.3	0.5
AF	1230393.7**	896.9	46219**	29752**	2144.5		13.7	339.2
MS/PSR	24.3**	0.19	1.20	1.19**	0.410		24.4	2.6
----- Pigmentos -----								
ChIT	37144.3**	456.1	899.6**	1233.7**	81.2		3.1	290.6
Car	1813.1**	38.8	99.7	475.6**	31.0		7.7	72.2
----- Sistema radical -----								
VR	835.1**	2.88	46.1*	21.9	10.6		26.8	12.1
RM	3.33	0.849	43.8**	42**	1.471		15.9	7.6
RF	172.6**	0.481	85.3**	48.9**	3.2		5.2	34.7
RMF	187.4**	1.691	22.1*	12*	3.7		3.3	57.6

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, *: significancia $p \leq 0.05$, **: significancia $p \leq 0.01$. PSR: peso seco de raíz; MF: materia fresca (g); LR: longitud de raíz (cm); MS: materia seca (g); AP: altura de la planta (cm); DT: diámetro del tallo (cm); AF: área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$); MS/PSR: relación materia seca: peso seco de raíz; ChlT: clorofila total (ChlT, $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ P.F.}$); Car: carotenoides ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ P.F.}$); VR: volumen de raíz (cm^3); RM: raíces medias (%); RF: raíces finas (%); RMF: raíces muy finas (%).

En la mayoría de los nutrientes evaluados en raíz, tallo, hoja y planta completa, el análisis de varianza mostró diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) entre las medias en la concentración microalgal (Cuadro 8), lo que confirma que la disponibilidad y acumulación nutrimental estuvo influenciada por la dosis aplicada.

En raíz, la concentración microalgal presentó efectos significativos ($p \leq 0.05$) en todos los nutrientes analizados, sin embargo, no se obtuvieron efectos estadísticamente diferentes en los genotipos ni en la interacción con las concentraciones. En tallo, además del efecto de la suspensión de la microalga, se observaron efectos del genotipo en nutrientes específicos como potasio (K), zinc (Zn) y manganeso (Mn), así como interacción significativa ($p \leq 0.05$) en varios nutrientes, incluyendo nitrógeno (N), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), manganeso (Mn) y boro (B), lo que evidencia diferencias entre genotipos en la redistribución de nutrientes. En hoja, la concentración microalgal también mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) en todos los nutrientes, mientras que el genotipo y la interacción fueron significativos en nutrientes específicos como hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) ($p \leq 0.05$), lo que indica que la acumulación nutrimental en hoja estuvo regulada tanto por la dosis de la suspensión de la microalga como por la respuesta del genotipo.

En la planta completa, la concentración microalgal, genotipo y su interacción mostraron significancias ($p \leq 0.05$) en la mayoría de los nutrientes, lo que indicó que la respuesta total de la planta fue el resultado de la interacción entre la concentración microalgal y la capacidad de absorción de cada genotipo. No obstante, nutrientes como zinc (Zn) y manganeso (Mn) no presentaron interacción significativa, lo que sugiere que su acumulación estuvo determinada principalmente por la suspensión de *N. vigensis*. Los coeficientes de variación fueron aceptables en todos los caracteres evaluados ($\text{CV} < 18$

%), aunque variables como el boro en tallo y el zinc en la planta completa presentaron mayor variabilidad asociada con el valor 19.9 y 28 %, respectivamente).

Cuadro 8. Cuadrados medios de la concentración de los nutrimentos en los diferentes órganos en *Solanum lycopersicum* L.

FV	CON	BLO(CON)	GEN	CON*GEN	ERROR	TOTAL	CV	MEDIA
GL	3	8	2	6	16	35		
----- Raíz -----								
N	2.23**	0.0043	0.0064	0.0024	0.0075		3.2	2.7
P	0.50**	0.0017	0.0073	0.0012	0.0036		6.3	0.9
K	1.71**	0.0153	0.0012	0.0085	0.0122		4.8	2.3
Ca	0.02**	0.0015	0.0001	0.0005	0.0004		8.3	0.2
Mg	0.07**	0.0011	0.0006	0.0002	0.0009		7.8	0.4
Na	0.06**	0.0008	0.0008	0.0002	0.0007		12.5	0.2
Fe	84961.7**	526.3	73.832	288.19	196.17		7.5	187.5
Cu	27677.1**	127.3	79.847	23.25	204.35		18.5	77.5
Zn	7642.5**	16.5	3.590	22.05	34.86		7.8	75.7
Mn	7909.5**	15.8	26.618	34.51	21.14		8.2	56.1
B	5625.9**	21.2	32.045	20.47	8.65		4.7	62.2
----- Tallo -----								
N	2.04**	0.121	0.0569	0.12**	0.023		7.6	2.0
P	0.05**	0.001	0.01*	0.001	0.001		4.2	0.7
K	14.68**	0.130	0.58**	0.119	0.076		8.2	3.3
Ca	0.25**	0.000	0.0013	0.008**	0.002		12.1	0.4
Mg	0.15**	0.002	0.0054	0.008*	0.003		15.3	0.3
Na	0.18**	0.003	0.0120	0.011	0.007		13.7	0.6
Fe	4706**	64.93	65.81	77.33	48.47		17.8	39.2
Cu	145**	0.186	1.743	4.05**	0.248		10.7	4.7
Zn	29712**	598.74	4594**	786.77	341.78		11.5	160.6
Mn	6108**	40.56	262*	757**	49.82		13.6	52.1

B	4549**	49.77	140.77	251*	64.89	19.9	40.5
----- Hoja -----							
N	1.0**	0.047	0.010	0.134*	0.039	5.7	3.5
P	0.07**	0.000	0.002	0.001	0.001	5.3	0.6
K	2.44**	0.146	0.308	0.50*	0.160	7.1	5.6
Ca	1.44**	0.011	0.009	0.007	0.008	10.9	0.8
Mg	0.23**	0.008	0.001	0.003	0.001	5.3	0.7
Na	0.17**	0.009	0.004	0.003	0.002	11.6	0.4
Fe	13560**	1452.5	762*	626.2*	194.7	7.9	176.7
Cu	467**	0.531	7.16**	1.49**	0.253	7.0	7.2
Zn	11188**	18.6	157**	77.98**	8.19	4.9	58.2
Mn	40445**	157.6	1590**	3566**	225.8	9.4	159.2
B	1897**	49.9	44.0	98.9*	29.6	6.4	85.2
----- Planta -----							
N	111761**	60.2	2270**	1391**	148.94	11	114
P	8939**	2.84	210**	161**	14.78	13	29
K	435504**	239.1	8121**	7400**	438.14	11	195
Ca	10147**	1.08	191**	137**	7.22	10	28
Mg	3320**	10.4	55**	36**	8.48	14	20
Na	1277**	3.14	106**	46**	3.51	11	17
Fe	1.77**	0.003	0.042**	0.029**	0.003	13	0.44
Cu	0.04**	0.00001	0.001**	0.0005**	0.00003	13	0.04
Zn	2.98**	0.011	0.004	0.011	0.017	28	0.47
Mn	2.81**	0.001	0.045**	0.021	0.007	18	0.44
B	0.53**	0.0002	0.013**	0.009**	0.001	10	0.24

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, *: significancia $p \leq 0.05$, **: significancia $p \leq 0.01$.
N: nitrógeno (%); P: fósforo (%); K: potasio (%); Ca: calcio (%); Mg: magnesio (%); Na: sodio (%);
Fe: hierro (mg kg⁻¹); Cu: cobre (mg kg⁻¹); Zn: zinc (mg kg⁻¹); Mn: manganeso (mg kg⁻¹); B: boro (mg kg⁻¹).

La concentración microalgal de *N. vigensis* tuvo efectos significativos ($p \leq 0.05$) sobre el balance parcial de nutrimentos (PB) y la eficiencia de utilización interna (EI) en la mayoría de los nutrimentos evaluados (Cuadro 9), así como el genotipo y la interacción concentración x genotipo, lo que indica que la respuesta nutrimental dependió tanto del tratamiento como del genotipo.

En el balance parcial de nutrimentos (PB), la concentración microalgal, el genotipo y su interacción presentaron efectos significativos en la mayoría de los nutrimentos ($p \leq 0.05$), con excepción de zinc (PBZn), donde su respuesta estuvo influenciada sólo por la concentración microalgal.

De la misma manera, en la eficiencia de utilización interna (EI), se obtuvieron efectos significativos ($p \leq 0.05$) por la concentración microalgal, el genotipo y la interacción en la mayoría de los nutrimentos, lo que evidencia variabilidad en la capacidad de los genotipos para utilizar los nutrimentos absorbidos en biomasa. No obstante, en algunos casos como fósforo (EIP) y potasio (EIK), no se detectaron efectos significativos de la concentración microalgal, lo que sugiere que su utilización interna fue relativamente estable independientemente del tratamiento.

Los efectos observados en las eficiencias nutrimentales se reflejaron en el crecimiento de las plantas. A pesar de que la tasa de crecimiento (C) del modelo exponencial (Figura 7) no mostró diferencias estadísticas (IC 95 %), la concentración microalgal presentó efectos significativos ($p \leq 0.05$) en la mayoría de las variables de crecimiento, lo que refuerza que el efecto de la suspensión de *N. vigensis* se manifestó en la acumulación de biomasa y no en la tasa de crecimiento (C) de la altura de la planta. Los coeficientes de variación aceptables para la mayoría de los índices calculados, a excepción del PBZn (22.1 %), EIP (22.6 %), EIK (28.3 %), EICu (47 %), ElZn (20.8) y EIMn (24.4) que presentaron mayor variabilidad.

Cuadro 9. Cuadrados medios de las eficiencias nutrimentales en *Solanum lycopersicum*
L. PB: balance parcial de nutrimentos; EI: eficiencia de utilización interna.

FV	CON	BLO(CON)	GEN	CON*GEN	ERROR	TOTAL	CV	MEDIA
GL	3	8	2	6	16	35		
----- Balance parcial de nutrimentos -----								
PBN	12290**	8.14	250**	151**	20.14		11.5	39.2
PBP	5186**	1.66	122**	93**	8.59		13.1	22.3
PBK	9741**	10.01	250**	210**	27.15		12.7	40.9
PBCa	2631**	0.30	50**	36**	1.94		9.7	14.4
PBMg	6539**	20.65	108**	71**	16.68		14.3	28.5
PBFe	635**	1.15	15**	10**	1.18		12.9	8.4
PBCu	1987**	0.75	42**	26**	1.44		13.0	9.3
PBZn	3599**	17.31	18.61	24.97	28.50		22.1	24.2
PBMn	10149**	2.46	155**	76*	22.98		18.2	26.4
PBB	260**	0.32	10**	6.41**	0.74		11.3	7.6
----- Eficiencia de utilización interna -----								
EIN	81**	17	160**	62**	12		19.9	18
EIP	207	214	2920**	1715**	244		22.6	69
EIK	29	6	105**	43**	9.40		28.3	11
EICa	5371**	119	3122**	1224**	274		19.3	86
EIMg	3390**	364	5459**	2210**	334		18.6	99
ElFe	7249652**	683377	6280366**	3008566**	439430		14.8	4477
EICu	1132385748**	54488226	450837942**	287351703**	75618292		47.0	152693
EIZn	20386037**	901777	10347402**	6382038**	990209		20.8	4777
EIMn	95158345**	1100732	32783016**	3252767*	1838266		24.4	5547
EIB	43433021**	1780245	24188004**	6900984*	2247611		19.0	7910

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, *: significancia $p \leq 0.05$, **: significancia $p \leq 0.01$.

Con la finalidad de caracterizar la suspensión de *N. vigensis*, se determinó su perfil de aminoácidos, observándose una mayor concentración de ácido glutámico, alanina,

prolina, leucina y ácido aspártico (Cuadro 10). Este patrón indicó predominio de aminoácidos asociados al metabolismo del nitrógeno y a procesos de crecimiento, lo que sugiere que la suspensión de la microalga no sólo facilita la absorción de nutrientes, sino también aporta aminoácidos potencialmente involucrados en la respuesta fisiológica de la planta.

Cuadro 10. Perfil de aminoácidos de *Neochloris vigensis*

Aminoácido	g /100 g M.S
Ácido Glutámico	0.482
Ac. Aspártico	0.422
Serina	0.074
Histidina	NC
Glicina	0.325
Treonina	0.240
Alanina	0.465
Arginina	0.250
Tirosina	0.198
Valina	0.289
Fenilalanina	0.294
Isoleucina	0.192
Leucina	0.421
Lisina	0.364
Prolina	0.463
NC: no cuantificado	

El peso seco de raíz (PSR), la materia fresca (MF), longitud de raíz (LR), materia seca (MS), altura de planta (AP), el diámetro de tallo (DT), volumen de raíz (VR) y el área foliar (AF) fueron mayores en la concentración de 0.42 g L⁻¹, mientras que el resto de los tratamientos con suspensión de *N. vigensis* produjeron efectos estadísticamente iguales a la concentración de 0.00 g L⁻¹ (Cuadro 11). Este comportamiento mostró que la

suspensión de *N. vigensis* actuó como un bioestimulante dependiente de la dosis, donde concentraciones bajas no fueron suficientes para inducir cambios fisiológicos significativos en el crecimiento ($p \leq 0.05$), mientras que concentraciones más altas incrementaron la disponibilidad o absorción de nutrientes, promoviendo la producción de biomasa, tal como se ha reportado en sistemas donde la respuesta del crecimiento está estrechamente relacionada con la disponibilidad nutrimental (Fageria et al., 2011; Lambers, 2023).

En la relación MS/PSR, las medias producidas por la concentración de 0.42 g L^{-1} fue estadísticamente diferente y superior al resto de los tratamientos. En pigmentos, la clorofila total (ChIT) fue mayor en 0.21 g L^{-1} , mientras que los carotenoides (Car) sobresalieron en 0.0 y 0.21 g L^{-1} , los cuales fueron estadísticamente iguales y superiores a 0.10 y 0.42 g L^{-1} , esto sugiere que la respuesta fotosintética no siguió la misma tendencia obtenida en crecimiento. Lo anterior indica que el incremento en biomasa no estuvo directamente asociado con un aumento en el contenido de pigmentos fotosintéticos, lo que sugiere una redistribución fisiológica donde, bajo mayores concentraciones de *N. vigensis*, la planta priorizó procesos de crecimiento y expansión celular sobre la acumulación de compuestos fotosintéticos, un comportamiento observado en condiciones de alta disponibilidad de nutrientes (Taiz et al., 2015). En el sistema radical, las raíces medias (RM) fueron estadísticamente iguales en todas las concentraciones. El porcentaje de raíces finas (RF) fue mayor en el testigo (0.00 g L^{-1}) y disminuyó conforme aumentó la concentración microalgal, mientras que las raíces muy finas (RMF) mostraron el comportamiento opuesto, siendo mayores en 0.42 g L^{-1} y menores en el testigo. Este comportamiento sugiere un cambio en la arquitectura radical conforme aumenta la concentración microalgal, favoreciendo una mayor proporción de raíces muy finas. Este cambio en la arquitectura radical es relevante desde el punto de vista funcional, ya que las raíces de menor diámetro están directamente asociadas con la absorción de agua y nutrientes debido a su mayor área superficial y actividad metabólica, lo que indica que la suspensión de *N. vigensis* pudo haber inducido una mayor capacidad de captación nutrimental a través del incremento de raíces muy finas (Comas et al., 2013).

Cuadro 11. Comparación de medias (Tukey) de la concentración de *Neochloris vigensis* (g L⁻¹) sobre los caracteres asociados al crecimiento, sistema radical y pigmentos de *Solanum lycopersicum* L.

CON	0.00	0.10	0.21	0.42	DMSH
----- Crecimiento -----					
PSR	0.66 b	0.45 c	0.35 c	1.03 a	0.19
MF	15.73 b	6.04 c	4.54 c	53.69 a	2.50
LR	53.58 b	48.62 bc	45.16 c	59.96 a	6.22
MS	1.63 b	0.68 c	0.53 c	4.94 a	0.62
AP	28.72 b	18.31 c	15.81 c	46.4 a	4.05
DT	0.51 b	0.33 c	0.31 c	0.77 a	0.04
AF	299.6 b	101.1 c	82.17 c	873.8 a	45.21
MS/PSR	2.47 a	1.54 c	1.49 c	5.00 a	0.65
----- Pigmentos -----					
ChIT	324.7b	244.7 c	363.8 a	229.3 c	32.24
Car	82.44a	60.82 b	86.31 a	59.13 b	9.40
----- Sistema radical -----					
VR	11.0 b	6.11 c	5.28 c	26.06 a	2.56
RM	8.22 a	7.4 a	6.88 a	8.02 a	1.39
RF	39.69 a	36.74 b	32.82 c	29.7 d	1.05
RMF	52.1 d	55.86 c	60.29 b	62.28 a	1.96

PSR: peso seco de raíz (g); MF: materia fresca (g); LR: longitud de raíz (cm); MS: materia seca (g); AP: altura de la planta (cm); DT: diámetro del tallo (cm); AF: área foliar (cm² planta⁻¹); MS/PSR: relación materia seca: peso seco de raíz; ChIT: clorofila total (ChIT, mg 100 g⁻¹ P.F.); Car: carotenoides (mg 100 g⁻¹ P.F.); VR: volumen de raíz (cm³); RF: raíces finas (%); RMF: raíces muy finas (%). Medias con letras iguales por filas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto a los nutrimentos extraídos por el órgano muestreado (Cuadro 12), en la raíz, el N y Fe fueron mayores con las concentraciones 0.10 y 0.21 g L⁻¹ de *N. vigensis*, mientras que K, Cu, Mn y B alcanzaron sus valores más altos en 0.42 g L⁻¹; el Zn fue mayor en 0.21 g L⁻¹. Los mayores valores de Ca se obtuvieron en el testigo (0.00 g L⁻¹) y

en 0.42 g L^{-1} , siendo estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). En todas las concentraciones con suspensión de la microalga el Mg fue estadísticamente mayor al testigo ($p \leq 0.05$), mientras que el Na fue mayor en 0.42 g L^{-1} . Para P, la concentración de 0.21 g L^{-1} presentó los valores más altos, mientras que el resto de las concentraciones produjeron medias estadísticamente iguales. En conjunto estos resultados indican que la respuesta nutrimental en raíz no fue uniforme, lo que indicó una respuesta directa del sistema radical a la suspensión de *N. vigensis*, posiblemente asociada a una mayor interacción de la concentración de la microalga con la superficie de la raíz. Este comportamiento no uniforme en la raíz indica que la absorción nutrimental estuvo regulada tanto por la disponibilidad de los nutrientes en solución como por la afinidad diferencial de absorción del sistema radical, lo que indica que la suspensión de *N. vigensis* pudo haber modificado la dinámica de captación a nivel de la rizosfera, favoreciendo la absorción de ciertos elementos en función de su movilidad y demanda metabólica.

En el tallo, el Cu, Zn, Mn y B fueron mayores y estadísticamente iguales en las concentraciones con suspensión de la microalga respecto al testigo, lo que indica una mayor acumulación al momento del muestreo de estos nutrientes en este órgano con la aplicación de la suspensión de *N. vigensis*. El K fue mayor en $0.10 - 0.42 \text{ g L}^{-1}$, el Ca, Na y Fe alcanzaron sus valores más altos en 0.21 g L^{-1} . Por su parte, el P fue mayor en todas las concentraciones con suspensión de *N. vigensis*, mientras que el N y Mg no mostraron diferencias significativas respecto al testigo ($p \leq 0.05$). Estos resultados sugieren que el tallo funcionó como un órgano de transporte y redistribución nutrimental, a través del sistema vascular compuesto por xilema y floema, responsables del movimiento de agua, nutrientes minerales y fotoasimilados dentro de la planta (Taiz et al., 2015), mostrando una acumulación intermedia que refleja su transporte hacia los tejidos en crecimiento.

En la hoja el N, P, K, Ca, Cu, Zn, Mn y B presentaron los mayores valores en la concentración de 0.42 g L^{-1} , lo cual coincide con el crecimiento observado en esta concentración. El Na fue mayor en $0.10 - 0.21 \text{ g L}^{-1}$, mientras que el Mg presentó valores más altos en el testigo y en 0.42 g L^{-1} , siendo estadísticamente iguales. La mayor acumulación de nutrientes en la hoja a la concentración de 0.42 g L^{-1} indica que este

órgano actuó como el principal sitio de demanda metabólica, lo que coincide con el incremento en crecimiento observado, evidenciando que la absorción nutrimental se tradujo en acumulación efectiva en los tejidos fotosintéticamente activos, reforzando la relación entre disponibilidad nutrimental y producción de biomasa, ya que la hoja constituye el principal órgano fotosintéticamente activo donde ocurre la fijación de carbono y la generación de fotoasimilados necesarios para el crecimiento vegetal (Taiz et al., 2015).

Cuadro 12. Comparación de medias de los nutrimentos por efecto de la concentración de *Neochloris vigensis* (g L⁻¹) en los diferentes órganos en *Solanum lycopersicum* L.

CON	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B
----- Raíz -----											
0.00	2.08 c	0.74 c	1.64 c	0.28 a	0.25 b	0.16 b	68.89 d	0.91 d	37.79 d	15.95 d	29.7 d
0.10	3.09 a	1.03 b	2.37 b	0.21 b	0.40 a	0.15 b	220.27 b	76.15 c	69.07 c	53.4 c	56.77 c
0.21	3.16 a	1.24 a	2.51 ab	0.20 b	0.43 a	0.18 b	299.35 a	103.56 b	104.19 a	70.2 b	75.17 c
0.42	2.62 b	0.78 c	2.60 ab	0.28 a	0.45 a	0.33 a	161.64 c	129.26 a	91.65 b	84.71 a	87.12 a
DMSH	0.10	0.06	0.19	0.06	0.05	0.04	34.63	17.03	6.13	6.01	6.95
----- Tallo -----											
	2.17										
0.00	ab	0.64 b	2.18 c	0.41 b	0.44 a	0.62 b	15.91 c	1.01 c	84.35 c	23.03 c	15.86 d
0.10	1.56 c	0.79 a	4.73 a	0.27 c	0.27 b	0.60 b	45.82 b	7.54 b	172.65 b	73.16 a	68.09 a
0.21	2.60 a	0.77 a	2.34 c	0.55 a	0.44 a	0.76 a	68.06 a	1.40 c	223.4 a	74.94 a	47.52 b
	1.69										
0.42	bc	0.79 a	4.12 b	0.17 d	0.18 c	0.42 c	26.96 c	8.66 a	161.86 b	37.08 b	30.57 c
DMSH	0.53	0.04	0.54	0.03	0.06	0.08	12.16	0.65	36.94	9.61	10.65
----- Hoja -----											
0.00	4.17 a	0.60 c	5.21 b	0.83 b	0.83 a	0.37 b	208.91 a	2.62 c	44.98 b	65.2 c	64.93 c
0.10	2.88 c	0.66 b	5.66 b	0.53 c	0.54 b	0.53 a	120.26 b	5.45 b	29.15 c	170.15 b	86.61 b
0.21	3.07 c	0.53 d	5.33 b	0.53 c	0.51 b	0.54 a	187.19 a	2.98 c	49.1 b	177.73 b	99.09 a
0.42	3.77 b	0.73 a	6.37 a	1.38 a	0.76 a	0.26 b	190.37 a	17.87 a	109.46 a	223.87 a	90.35 ab
DMSH	0.33	0.03	0.58	0.16	0.14	0.14	57.53	1.10	6.51	18.95	10.67

N: nitrógeno (%); P: fósforo (%); K: potasio (%); Ca: calcio (%); Mg: magnesio (%); Na: sodio (%); Fe: hierro (mg kg⁻¹); Cu: cobre (mg kg⁻¹); Zn: zinc (mg kg⁻¹); Mn: manganeso (mg kg⁻¹); B: boro (mg kg⁻¹). Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En todos los nutrientes evaluados, la mayor extracción por planta se obtuvo con 0.42 g L⁻¹, difiriendo del resto de las concentraciones. El testigo (0.00 g L⁻¹) mostró valores intermedios, mientras que los resultados de 0.10 y 0.21 g L⁻¹ fueron estadísticamente iguales y se obtuvieron las menores extracciones en la mayoría de los nutrientes evaluados. Este comportamiento confirma que la mayor concentración microalgal favoreció una mayor acumulación nutrimental en la parte aérea, lo que coincide con el mayor crecimiento observado en la concentración mencionada (Cuadro 13). Este resultado sugiere que la disponibilidad y absorción de nutrientes fue un factor determinante en la producción de biomasa, ya que un mayor contenido nutrimental en la planta generalmente se traduce en un incremento en el crecimiento vegetal cuando no existen limitaciones fisiológicas internas (Lambers, 2023).

Cuadro 13. Comparación de medias de los nutrientes extraídos por *Solanum lycopersicum* L. (mg planta⁻¹) por efecto de la concentración (CON) de *Neochloris vigensis*.

CON	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B
0.00	115.9 b	22.6 b	132.6 b	22.6 b	23.1 b	17.6 b	0.42 b	0.007 bc	0.23 b	0.16 b	0.15 b
0.10	32.5 c	10.5 c	75.5 c	5.7 c	5.9 c	8.2 c	0.12 c	0.010 b	0.15 b	0.19 b	0.11 c
0.21	36.1 c	8.3 c	49.8 d	6.6 c	5.9 c	8.1 c	0.16 c	0.003 c	0.18 b	0.16 b	0.09 c
0.42	270.6 a	75.6 a	520.4 a	77.0 a	46.4 a	33.4 a	1.08 a	0.132 a	1.33 a	1.28 a	0.60 a
DMSH	11.7	2.5	23.3	1.6	4.9	2.7	0.09	0.006	0.16	0.04	0.02

N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Fe: hierro; Cu: cobre; Zn: zinc; Mn: manganeso; B: boro. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En todos los nutrientes evaluados, el balance parcial de nutrientes (PB) fue mayor en 0.42 g L⁻¹, difiriendo del resto de las concentraciones. El testigo presentó valores intermedios, mientras que 0.10 y 0.21 g L⁻¹ no difirieron entre sí y mostraron las menores eficiencias en la mayoría de los nutrientes, lo cual indica que la mayor concentración

microalgal favoreció una mayor recuperación de nutrimentos de la solución nutritiva, lo cual coincide con la mayor extracción y acumulación nutrimental observada. Este comportamiento sugiere que el incremento en la disponibilidad o captación de nutrimentos promovido por la suspensión de *N. vigensis* se tradujo en una mayor recuperación aparente de los mismos, lo cual es consistente con sistemas donde la absorción nutrimental es el principal factor que limita el crecimiento vegetal (Lambers, 2023).

La eficiencia de utilización interna de Zn, Mn y B en 0.42 g L⁻¹ presentó valores estadísticamente diferentes a los del testigo (0.00 g L⁻¹), mientras que el resto de los nutrimentos fue estadísticamente igual entre el testigo y las diferentes concentraciones microalgales. Esto sugiere que, aunque la absorción nutrimental aumentó con la concentración microalgal, su conversión en biomasa se mantuvo relativamente estable para la mayoría de los nutrimentos (Cuadro 14). Sin embargo, en el caso de Zn, Mn y B, se observaron cambios en su eficiencia de utilización interna, lo que sugiere una participación más activa de estos micronutrimentos en los procesos de crecimiento, al estar más directamente asociados con la producción de biomasa por unidad de nutrimento absorbido, debido a que el Zn participa en la regulación enzimática y síntesis de proteínas (Broadley et al., 2007), el Mn en procesos fotosintéticos y activación enzimática (Millaleo et al., 2010), y el B en la integridad de la pared celular y el desarrollo de tejidos (Brown et al., 2002).

Cuadro 14. Comparación de medias de las eficiencias obtenidas en *Solanum lycopersicum* L. por efecto de la concentración (CON) de *Neochloris vigensis*.

CON	Eficiencias									
	----- Eficiencia parcial de nutrimentos (PB) -----									
	PBN	PBP	PBK	PBCa	PBMg	PBFe	PBCu	PBZn	PBMn	PBB
0.00	46.45 b	17.22 b	42.46 b	11.97 b	32.44 b	8.18 b	2.53 b	31.99 b	9.39 b	8.28 b
0.10	10.90 c	8.05 c	21.69 c	2.99 c	8.15 c	2.21 c	2.40 b	8.79 c	10.32 b	4.50 c
0.21	10.83 c	6.36 c	12.91 d	3.40 c	8.22 c	2.87 c	0.60 c	7.07 c	9.02 b	2.79 d
0.42	88.58 a	57.6 a	86.64 a	39.3 a	65.09 a	20.35 a	31.51 a	48.86 a	76.73 a	14.91 a
DMSH	4.31	1.94	4.78	0.82	6.86	1.62	1.31	6.28	2.37	0.86

	----- Eficiencia de utilización interna (EI) -----									
	EIN	EIP	EIK	EICa	EIMg	EIFe	EICu	EIZn	EIMn	EIB
0.00	14.0 b	74.8 a	12.3 a	71.3 c	71.3 b	3881 b	252737 a	6923 a	10420 a	10908 a
0.10	21.2 a	65.0 a	9.1 a	119.0 a	116.7 a	5705 a	75710 b	4723 b	4120 b	6132 c
0.21	16.9 ab	74.8 a	12.5 a	88.0 b	100.3 a	3741 b	244953 a	3745 b	3783 b	6410b c
0.42	18.2 ab	65.4 a	9.5 a	64.0 c	105.8 a	4580 ab	37371 b	3718 b	3866 b	8188 b
DMSH	6.2	22.1	3.8	16.5	28.8	1247.9	111433	1434	1584	2014

Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto a los caracteres asociados al crecimiento de la planta respecto a la interacción concentración x genotipo (Cuadro 15), el peso seco de raíz (PSR) fue estadísticamente mayor en 0.42 g L⁻¹ (T10–T12) ($p \leq 0.05$). Asimismo, la materia fresca (MF), materia seca (MS), altura de la planta (AP), diámetro del tallo (DT), área foliar (AF) y la relación materia seca: peso seco de raíz (MS/PSR) presentaron sus mayores valores en la concentración de 0.42 g L⁻¹ en todos los genotipos, lo que indica una respuesta consistente a la suspensión de *N. vigensis* respecto a la dosis. Por su parte, la longitud de raíz (LR) no mostró diferencias estadísticas respecto al testigo, lo que confirma que el efecto de la concentración de la microalga se manifestó principalmente en el crecimiento aéreo y en la acumulación de biomasa. En la interacción, el mayor crecimiento se observó con la combinación de 0.42 g L⁻¹ con el genotipo Aguamiel (T10) lo que evidencia una mayor respuesta de este genotipo a la aplicación de la concentración de *N. vigensis*. Este comportamiento sugiere que, aunque la tendencia de respuesta a la suspensión de *N. vigensis* fue similar entre genotipos, la magnitud del crecimiento fue distinta entre ellos, reflejando diferencias en su capacidad de respuesta en términos de acumulación de biomasa.

Cuadro 15. Comparación de medias de la interacción concentración x genotipo de los caracteres asociados al crecimiento en genotipos de *Solanum lycopersicum* L.

CON	PSR	MF	MS	AP	AF	MS/PSR
----- EI CID -----						
0.00	0.58 bcd	14.47 c	1.40 cd	27.19 cd	283.16 c	2.40 cd
0.10	0.57 bcd	6.73 d	0.73 ed	18.63 e	108.97 d	1.64 d
0.21	0.28 d	3.62 d	0.34 e	12.72 f	57.88 d	1.61 d
0.42	1.14 a	60.87 a	5.63 a	45.31 b	1014.91 a	5.21 ab
----- Aguamiel -----						
0.00	0.81 abc	18.60 c	2.09 c	32.18 c	355.95 c	2.59 cd
0.10	0.45 cd	6.20 d	0.73 de	19.63 e	106.11 d	1.30 d
0.21	0.43 cd	5.40 d	0.68 de	16.75 ef	102.48 d	1.19 d
0.42	0.88 ab	58.27 a	5.24 a	51.48 a	967.74 a	6.09 a
----- 52/47S8 -----						
0.00	0.58 bcd	14.13 c	1.40 cd	26.79 cd	259.63 c	2.42 cd
0.10	0.33 d	5.20 d	0.57 de	16.69 ef	88.10 d	1.69 d
0.21	0.34 d	4.60 d	0.57 ed	17.96 ef	86.15 d	1.68 d
0.42	1.06 a	41.93 b	3.94 b	42.42 b	638.72 b	3.70 bc
DMSH	0.32	7.27	1.35	8.86	298.71	1.98

PSR: peso seco de raíz (g); MF: materia fresca (g); MS: materia seca (g); AP: altura de la planta (cm); AF: área foliar (cm² planta⁻¹); MS/PSR: relación materia seca. Medias con letras iguales por columnas en cada genotipo son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto a la distribución radical, con la interacción concentración x genotipo, el porcentaje de raíces finas (RF) fue estadísticamente mayor en el testigo (0.00 g L⁻¹), con excepción de 52/47S8. En contraste, las raíces muy finas (RMF) mostraron un comportamiento opuesto, con los valores más altos en 0.42 g L⁻¹. Este comportamiento confirma que el efecto de la suspensión de microalgas sobre la arquitectura radical estuvo determinado principalmente por la concentración y no por el genotipo, evidenciando una respuesta consistente independientemente del genotipo.

Por otro lado, la clorofila total (ChIT) presentó los valores más bajos en 0.42 g L⁻¹ en todos los genotipos, en comparación con el testigo (0.00 g L⁻¹). Esto es consistente con lo observado previamente, donde el incremento en crecimiento no estuvo acompañado por un aumento en pigmentos, lo que sugiere una redistribución fisiológica hacia procesos de acumulación de biomasa más que hacia la síntesis de compuestos fotosintéticos (Cuadro 16).

Cuadro 16. Comparación de medias de la interacción concentración x genotipo sobre los caracteres asociados al sistema radical y pigmentos en genotipos de *Solanum lycopersicum* L.

CON	RM	RF	RMF	ChIT	Car
----- El CID -----					
0.00	6.14 ed	39.12 ab	54.75 def	303.40 d	71.21 cd
0.10	4.63 ed	38.87 ab	56.50 cde	243.88 e	59.62 de
0.21	4.08 ed	34.02 bc	61.90 abc	366.52 ab	94.27 ab
0.42	9.89 abc	29.53 cd	60.59 abcd	214.22 f	52.89 e
----- Aguamiel -----					
0.00	7.41 bcd	40.16 a	52.42 ef	344.94 bc	71.20 cd
0.10	11.75 a	30.88 c	57.37 bcde	246.38 e	63.22 de
0.21	13.44 a	25.27 d	61.28 abc	344.54 bc	83.62 bc
0.42	6.57 cde	30.91 c	62.52 ab	261.43 e	69.14 cde
----- 52/47S8 -----					
0.00	11.1 ab	39.78 a	49.11 f	325.85 cd	104.90 a
0.10	5.81 ed	40.47 a	53.72 ef	243.88 e	59.62 de
0.21	3.12 e	39.18 ab	57.7 bcde	380.25 a	81.03 bc
0.42	7.60 bcd	28.66 cd	63.74 a	212.27 f	55.35 de
DMSH	2.97	5.61	7.28	37.03	35.92

ChIT: clorofila total (ChIT, mg 100 g⁻¹ P.F.); Car: carotenoides (mg 100 g⁻¹ P.F.); RF: raíces finas (%); RMF: raíces muy finas (%). Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En el tallo, bajo la interacción concentración x genotipo, la acumulación de N fue mayor en 0.21 g L⁻¹, mientras que 0.10 y 0.42 g L⁻¹ presentaron los valores más bajos y el testigo valores intermedios, sin un patrón definido entre concentraciones. En calcio (Ca), el testigo (0.00 g L⁻¹) obtuvo los valores más altos, mientras que varios tratamientos con suspensión de microalgas, particularmente a 0.42 g L⁻¹, se ubicaron entre los valores más bajos (Cuadro 17). El resto de los tratamientos presentaron valores intermedios, sin una separación consistente entre concentraciones, mostrando un comportamiento similar en magnesio (Mg). En cobre (Cu), los tratamientos con 0.10 y 0.42 g L⁻¹ se agruparon entre los valores más altos, mientras que los de 0.21 g L⁻¹ se ubicaron entre los más bajos, sin traslape claro entre ambos grupos, lo que evidencia una diferencia más definida entre concentraciones dentro de la interacción. En manganeso (Mn) y boro (B), los valores más altos se obtuvieron con las concentraciones intermedias (0.10 y 0.21 g L⁻¹) mientras que los tratamientos con las concentraciones 0.00 y 0.42 g L⁻¹ fueron estadísticamente iguales en todos los genotipos (Cuadro 17). En conjunto, estos resultados indican que la acumulación nutrimental en el tallo no respondió de manera uniforme a la suspensión de *N. vigensis*, mostrando patrones específicos según el nutrimento, lo que sugiere que este órgano refleja principalmente procesos de redistribución interna más que una acumulación directa.

Cuadro 17. Comparación de medias de los nutrimentos en tallo de *Solanum lycopersicum* L. por efecto de la interacción concentración x genotipo.

CON	N	Ca	Mg	Cu	Mn	B
----- El CID -----						
0.00	2.14 bc	0.41 bc	0.44 abc	0.67 e	22.17 de	18.09 de
0.10	1.54 d	0.27 def	0.25 de	9.54 a	90.48 a	58.99 b
0.21	2.52 ab	0.51 b	0.36 bcd	1.06 e	54.10 b	39.75 bcd
0.42	1.8 cd	0.18 ef	0.19 e	8.97 ab	39.05 bcde	31.52 cde
----- Aguamiel -----						
			0.39			
0.00	2.15 bc	0.40 bcd	abcd	1.57 e	19.88 e	14.68 e
0.10	1.53 d	0.25 ef	0.25 de	5.74 d	49.82 bc	60.39 ab

0.21	2.99 a	0.65 a	0.52 a	1.84 e	90.75 a	57.37 b
0.42	1.63 d	0.16 f	0.17 e	9.23 ab	30.40 cde	29.58 cde
----- 52/47S8 -----						
0.00	2.21 bc	0.43 b	0.48 ab	0.81 e	27.05 de	14.81 e
0.10	1.61 d	0.29 cde	0.31 cde	7.33 c	79.18 a	84.9 a
0.21	2.29 b	0.49 b	0.44 abc	1.30 e	79.98 a	45.43 bc
0.42	1.64 d	0.17 ef	0.18 e	7.78 bc	41.79 bcd	30.61 cde
DMSH	0.27	0.16	0.23	3.21	54.94	68.07

N: nitrógeno (%); Ca: calcio (%); Mg: magnesio (%); Cu: cobre (mg kg^{-1}); Mn: manganeso (mg kg^{-1}); B: boro (mg kg^{-1}). Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En la hoja, con la interacción concentración x genotipo, la concentración de nitrógeno (N) fue mayor con los tratamientos 0.00 g L^{-1} y 0.42 g L^{-1} , los cuales fueron estadísticamente iguales en todos los genotipos. En relación con el potasio (K), fue estadísticamente igual en todos los tratamientos respecto al testigo en todos los genotipos.

La concentración microalgal de 0.10 g L^{-1} presentó los valores más bajos de nutrimentos en hoja, mientras que el resto de las concentraciones fueron estadísticamente iguales. En micronutrimentos (Cu, Zn, Mn) el mejor tratamiento fue la concentración de 0.42 g L^{-1} , lo que coincide con las tendencias observadas anteriormente. El hierro (Fe) no mostró una separación clara entre concentraciones, aunque algunos tratamientos del testigo y de 0.21 g L^{-1} se ubicaron entre los valores más altos, mientras que en boro (B), todos los tratamientos con aplicación de la suspensión *N. vigensis* presentaron valores estadísticamente iguales y superiores a los del testigo en todos los genotipos (Cuadro 18). Estos resultados muestran que la acumulación nutrimental en la hoja respondió principalmente a la concentración microalgal, con menor influencia del genotipo, lo que refuerza el papel de este órgano como sitio final de acumulación de nutrimentos.

Cuadro 18. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en hoja *Solanum lycopersicum* L. por efecto de la interacción concentración x genotipo.

CON	N	K	Fe	Cu	Zn	Mn	B
----- El CID -----							
0.00	4.17 ab	5.31 ba	196.39 ab	3.59 de	42.61 de	63.03 f	63.93 c
0.10	2.88 d	5.48 ba	128.5 cd	5.98 c	28.3 f	209.98 bc	87.68 b
0.21	3.15 cd	4.88 b	179.22 ab	3.99 d	44.81 cde	149.03 de	93.60 ab
0.42	3.71 bac	6.41 a	182.76 ab	18.39 a	103.96 b	222.0 ab	94.03 ab
----- Aguamiel -----							
0.00	4.05 ab	4.88 b	214.64 a	2.59 def	41.5 e	55.73 f	67.19 c
0.10	2.79 d	5.23 ba	117.70 d	4.14 d	32.15 f	131.62 e	84.75 b
0.21	3.31 cd	5.79 ba	216.01 a	2.24 ef	52.01 c	212.9 bc	110.34 a
0.42	3.73 abc	6.45 a	195.16 ab	16.8 b	104.46 b	187.51 bcd	87.08 b
----- 52/47S8 -----							
0.00	4.28 a	5.44 ab	215.71 a	1.67 f	50.84 cd	76.83 f	63.67 c
0.10	2.99 d	6.28 a	114.58 d	6.21 c	27.0 f	168.85 cde	87.40 b
0.21	2.76 d	5.33 ab	166.34 bc	2.7 def	50.48 cd	171.24 cde	93.33 b
0.42	3.99 ab	6.25 a	193.21 ab	18.41 a	119.96 a	262.09 a	89.94 b
DMSH	0.35	1.25	80.70	3.24	20.36	116.97	46.01

N: nitrógeno (%); K: potasio (%); Fe: hierro (mg kg⁻¹); Cu: cobre (mg kg⁻¹); Zn: zinc (mg kg⁻¹); Mn: manganeso (mg kg⁻¹); B: boro (mg kg⁻¹). Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En la extracción total de nutrimentos por la planta, bajo la interacción concentración x genotipo, todos los nutrimentos evaluados (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu y B) presentaron sus mayores valores en la concentración de 0.42 g L⁻¹ de *N. vigensis*, mientras que el resto de las concentraciones (0.00, 0.10 y 0.21 g L⁻¹) mostraron valores estadísticamente iguales o inferiores (Cuadro 19). Los genotipos El CID y Aguamiel presentaron una mayor acumulación de macronutrimentos en comparación con el 52/47S8, lo que indica una mayor respuesta de estos genotipos al efecto de la suspensión de microalgas (Cuadro 19).

Cuadro 19. Comparación de medias de los nutrientes extraídos por *Solanum lycopersicum* L. (mg planta⁻¹) por efecto de la interacción concentración x genotipo.

CON	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	B
----- EI CID -----									
0.00	112.3 c	21.1 cd	132.0 cd	22.1 c	22.8 c	18.2 d	0.40 c	0.01 d	0.15 de
0.10	36.9 d	12.1 def	84.6 cde	6.4 d	6.6 d	9.7 ef	0.14 d	0.01 d	0.12 def
0.21	45.8 d	10.3 def	56.6 e	7.8 d	7.0 d	9.9 ef	0.20 d	0.01 d	0.10 def
0.42	310.1 a	84.9 a	597.8 a	87.2 a	52.8 a	42.0 a	1.22 a	0.16 a	0.71 a
----- Aguamiel -----									
0.00	127.7 c	25.5 c	137.8 c	25.3 c	24.9 c	19.6 cd	0.48 c	0.01 d	0.17 d
0.10	31.6 d	10.5 def	71.4 de	5.6 d	5.8 d	7.8 f	0.12 d	0.01 d	0.11 def
0.21	26.3 d	5.5 f	34.1 e	5.1 d	4.2 d	5.7 f	0.11 d	0.01 d	0.07 f
0.42	278.4 a	83.2 a	554.8 a	82.5 a	47.6 ab	32.9 b	1.16 a	0.14 b	0.62 b
----- 52/47S8 -----									
0.00	107.6 c	21.0 cde	127.9 cd	20.6 c	21.5 c	15.2 ed	0.39 c	0.01 d	0.13 def
0.10	29.0 d	9.0 f	70.5 de	5.1 d	5.2 d	7.1 f	0.10 d	0.01 d	0.11 def
0.21	36.2 d	9.2 ef	58.7 e	6.8 d	6.6 d	8.6 f	0.17 d	0.01 d	0.10 ef
0.42	223.4 b	58.7 b	408.7 b	61.2 b	38.9 b	25.2 c	0.86 b	0.10 c	0.48 c
DMSH	29.9	11.9	79.2	11.7	14.9	10.8	0.36	0.04	0.21

N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Fe: hierro; Cu: cobre; B: boro. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En todos los nutrientes evaluados (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn y B), los mayores valores de PB se obtuvieron en la concentración de 0.42 g L⁻¹ en los tres genotipos, difiriendo del resto de los tratamientos. En contraste, las concentraciones intermedias con suspensión de microalgas (0.10 y 0.21 g L⁻¹) y el testigo (0.00 g L⁻¹) presentaron valores menores y, en la mayoría de los casos, no difirieron estadísticamente entre sí. Este comportamiento indica que la absorción y acumulación nutrimental estuvo principalmente determinada por la concentración del microalgal, alcanzando en algunos casos valores cercanos o superiores al 100% para nitrógeno, lo que sugiere una alta capacidad de absorción en el sistema balsa flotante-planta. Este resultado podría estar asociado a la

dinámica de producción en balsa flotante, donde los genotipos compartieron la misma solución nutritiva, lo que pudo influir en la disponibilidad y redistribución de los nutrimentos, favoreciendo una absorción diferente por las plantas (Cuadro 20).

Los valores de PBN superan los comúnmente reportados en sistemas en suelo (30-60 %) y comparables o incluso mayores a la obtenidos en sistemas hidropónicos (70-90 %) (Sonneveld & Voogt, 2009; Savvas & Gruda, 2018). En este contexto, la mayor recuperación observada a 0.42 g L⁻¹ sugiere que el uso de la suspensión de *N. vigensis* en condiciones de balsa flotante favoreció una mayor disponibilidad y captación de nutrimentos, reduciendo pérdidas y mejorando su aprovechamiento por la planta.

Cuadro 20. Comparación de medias del balance parcial (PB) de nutrimentos por *Solanum lycopersicum* L. (%) de la interacción concentración x genotipo.

CON	PBN	PBP	PBK	PBCa	PBMg	PBFe	PBCu	PBMn	PBB
----- El CID -----									
0.00	45.0 c	16.1 cd	42.3 c	11.7 c	32.0 c	7.6 c	2.9 d	8.1 c	8.1 c
0.10	12.4 d	9.3 de	24.3 d	3.4 d	9.2 d	2.6 d	3.3 d	4.9 de	4.9 de
0.21	13.7 d	7.9 de	14.7 d	4.0 d	9.7 d	3.5 d	0.8 d	3.2 ef	3.2 ef
0.42	101.5 a	64.7 a	99.5 a	44.5 a	74.0 a	23.0 a	36.9 a	17.5 a	17.5 a
----- Aguamiel -----									
0.00	51.2 c	19.5 c	44.1 c	13.7 c	35.0 c	9.4 c	3.2 d	9.5 bc	9.5 bc
0.10	10.6 d	8.0 de	20.5 d	2.9 d	8.1 d	2.2 d	1.8 d	4.3 ef	4.3 ef
0.21	7.9 d	4.2 e	8.8 d	2.6 d	5.8 d	2.1 d	0.34 d	2.2 f	2.2 f
0.42	91.1 a	63.4 a	92.4 a	42.1 a	66.7 ab	21.9 a	32.9 b	15.3 a	15.3 a
----- 52/47S8 -----									
0.00	43.1 c	16.0 cd	41.0 c	10.9 c	30.2 c	7.7 c	1.5 d	7.3 cd	7.3 cd
0.10	9.7 d	6.9 e	20.3 d	2.7 d	7.2 d	1.8 d	2.1 d	4.3 ef	4.3 ef
0.21	10.8 d	7.0 e	15.2 d	3.5 d	9.1 d	3.0 d	0.6 d	3.0 ef	3.0 ef
0.42	73.1 b	44.7 b	68.0 b	31.2 b	54.8 b	16.2 b	24.7 c	11.9 b	11.9 b
DMSH	13.9	9.1	16.1	4.3	12.6	3.4	3.7	14.8	2.7

N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Fe: hierro; Cu: cobre; Mn: manganeso; B: boro. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto a la eficiencia de utilización interna (EI) en la interacción concentración x genotipo (Cuadro 21) los macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg), presentaron valores de EI estadísticamente iguales al comparar los tratamientos con suspensión de microalgas respecto al testigo en los tres genotipos, lo que indica que la utilización interna de estos nutrientes no tuvo un efecto por la aplicación de la suspensión de *N. vigensis*.

En contraste, en los micronutrientes se obtuvieron valores de EI más variables entre genotipos. En todos los tratamientos con suspensión de *N. vigensis* se obtuvieron los valores más bajos en el índice de utilización interna (EI) en manganeso (Mn) (Cuadro 22), lo que indica una mayor eficiencia en la producción de biomasa por unidad de nutriente absorbido. En términos de eficiencia de utilización interna, no se observó un único genotipo superior para todos los nutrientes; sin embargo, la combinación EI CID con la concentración de 0.21 g L⁻¹ (T7) produjo las mejores eficiencias (valores más bajos de EI) en varios micronutrientes (Fe, Zn, B y Mn), lo que indica una mayor eficiencia en la producción de biomasa por unidad de nutriente absorbido. No obstante, este comportamiento no fue consistente con las mayores alturas de planta observadas, lo que sugiere que el crecimiento pudo haber estado limitado por otro nutriente. En este sentido, el cobre (Cu), que presentó menores niveles de eficiencia de utilización, pudo haber actuado como nutriente limitante, restringiendo el crecimiento de la planta, en concordancia con el principio de la ley del mínimo (Lambers, 2023).

Cuadro 21. Comparación de medias de la eficiencia de utilización interna (EI) de macronutrientes en *Solanum lycopersicum* L. de la interacción concentración x genotipo.

CON	EIN	EIP	EIK	EICa	EIMg
----- EI CID -----					
0.00	12 bc	66 bc	11 b	63 cd	61 cd
0.10	20 ab	60 bc	9 b	114 abc	110 bc
0.21	7.0 c	32 c	6 b	46 d	48 d

0.42	18 ab	67 bc	9 b	65 cd	107 bc
----- Aguamiel -----					
			15		
0.00	17 bc	83 b	ab	83 bcd	87 bcd
0.10	23 ab	70 bc	10 b	131 ab	126 ab
0.21	28 a	131 a	22 a	136 a	168 a
0.42	19 ab	63 bc	9 b	63 cd	110 bc
----- 52/47S8 -----					
0.00	13 bc	66 bc	11 b	68 cd	66 cd
0.10	21 ab	65 bc	8 b	113 abc	114 abc
0.21	16 bc	61 bc	10 b	82 bcd	85 bcd
					100
0.42	17 abc	67 bc	10 b	64 cd	bcd
DMSH	11	48	9	51	57

N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 22. Comparación de medias de la eficiencia de utilización interna (EI) de micronutrientes en *Solanum lycopersicum* L. de la interacción concentración x genotipo.

CON	EIFe	EICu	EIZn	EIMn	EIB
----- EI CID -----					

0.00	3639 bc	179331 bc	6706 abc	9455 ab	9667 abcd
0.10	5198 ab	55978 c	5100 abcde	2937 d	6035 cde
0.21	1740 c	82188 bc	1615 f	2071 d	3197 e
0.42	4642 ab	36490 c	4313 bcdef	3812 d	7963 abcd
----- Aguamiel -----					

0.00	4393 ab	244723 abc	8069 a	13473 a	12366 a
0.10	5996 a	101866 bc	4513 bcdef	5632 bcd	6898 bcde
0.21	6047 a	457845 a	7013 ab	6173 bcd	10203 abc
0.42	4533 ab	37967 c	3720 cdef	4544 cd	8450 abcd

	52/47S8				
0.00	3612 bc	334158 ab	5994 abcd	8332 bc	10693 ab
0.10	5922 a	69286 bc	4557 bcdef	3790 d	5464 de
0.21	3434 bc	194827 abc	2606 ef	3106 d	5830 cde
0.42	4566 ab	37657 c	3122 def	3241 d	8151 abcd
DMSH	2049	268809	3245	4422	4892

Fe: hierro; Cu: cobre; Zn: zinc; Mn: manganeso; B: boro. Medias con letras iguales por columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

El análisis de correlación mostró asociaciones positivas y significativas entre los índices de crecimiento y el balance parcial de nutrimentos (PB) ($r \geq 0.90$; $p \leq 0.01$), lo que indica que el incremento en biomasa estuvo estrechamente relacionado con una mayor absorción nutrimental. Este comportamiento coincide con lo reportado en nutrición vegetal, donde el crecimiento está directamente determinado por la disponibilidad y absorción de nutrimentos (Fageria et al., 2011; Lambers, 2023). Asimismo, se observó una relación negativa entre las raíces finas (RF) y las raíces muy finas (RMF) ($r \leq -0.80$; $p \leq 0.01$) y una alta asociación positiva entre RMF con la mayoría de los nutrimentos, lo que sugiere una reorganización de la arquitectura radical hacia estructuras más eficientes en la absorción. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Comas et al. (2013) y Freschet et al. (2021), quienes señalaron que las raíces de menor diámetro presentan mayor actividad metabólica y capacidad de captación de agua y nutrimentos (Figura 10).

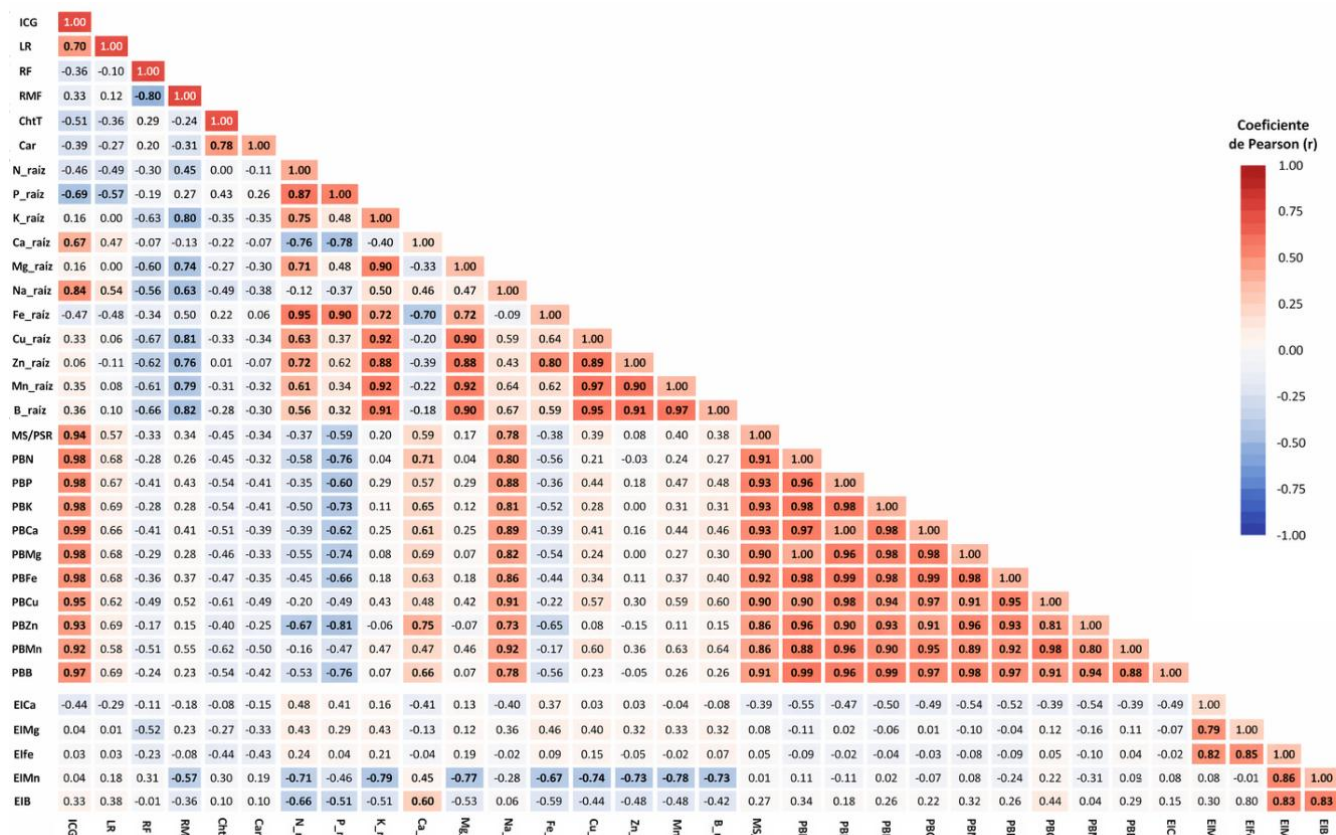


Figura 10. Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre variables de crecimiento, sistema radical, pigmentos, nutrientes en raíz, e índices de balance parcial y eficiencias de utilización interna en *Solanum lycopersicum* L. por efecto de la concentración de *Neochloris vigensis*.

En contraste, los pigmentos fotosintéticos mostraron correlaciones débiles o negativas con las variables de crecimiento, lo que indica que el incremento en biomasa no estuvo asociado con una mayor capacidad fotosintética, sino con una mayor disponibilidad nutrimental. Este resultado ha sido reportado en condiciones de alta disponibilidad de nutrientes, donde la planta prioriza la acumulación de biomasa sobre la concentración de compuestos fotosintéticos (Taiz et al., 2015).

Por otro lado, las eficiencias de utilización interna (EI) presentaron correlaciones negativas con las variables de crecimiento y acumulación nutrimental, así como con los nutrientes en raíz. La EIMn presentó correlaciones negativas en diversos nutrientes en raíz: N ($r \leq -0.71$; $p \leq 0.01$), K ($r \leq -0.79$; $p \leq 0.01$), Mg ($r \leq -0.77$; $p \leq 0.01$), Cu ($r \leq -$

0.74; $p \leq 0.01$), Zn ($r \leq -0.73$; $p \leq 0.01$) y B ($r \leq -0.73$; $p \leq 0.01$), lo que indica que la eficiencia en el uso interno de Mn por la planta aumenta cuando estos nutrientes no se acumulan en raíz, lo que podría estar asociado a procesos de regulación, almacenamiento o redistribución interna de nutrientes (Lambers, 2023; Baligar et al., 2001). En conjunto, y considerando los altos valores de PB, la respuesta de la planta estuvo dominada por una mayor captación nutrimental y un mejor uso eficiente del Mn en todos los genotipos en la concentración de 0.42 g L⁻¹. Los demás tratamientos pudieron haberse visto restringidos en el crecimiento por cambios en la eficiencia fisiológica, en concordancia con el principio de la ley del mínimo (Lambers, 2023). Este desacople entre absorción y eficiencia de uso ha sido reportado en sistemas donde la disponibilidad nutrimental es alta, lo que limita la expresión de la eficiencia interna como factor determinante del crecimiento (Fageria et al., 2008; Moll et al., 1982), o bien podría estar asociado a concentraciones bajas de la suspensión de *N. vigensis*, que pudieron favorecer una competencia entre *N. vigensis* y el cultivo por los nutrientes disponibles.

Este comportamiento también puede estar asociado a la presencia de aminoácidos en la microalga, evidenciada en el análisis realizado (Cuadro 10), donde destacaron compuestos como ácido glutámico, ácido aspártico, glicina y prolina. Estos aminoácidos han sido reportados como bioestimulantes capaces de mejorar la absorción y el uso interno de nutrientes (Calvo et al., 2014; Colla et al., 2015; Rouphael & Colla, 2020). En particular, pueden contribuir a la formación de complejos con micronutrientes, actuando como agentes complejantes que favorecen su disponibilidad y movilidad en la planta (Hinsinger et al., 2009; Rengel, 2023). Asimismo, participan como compuestos señalizadores en la regulación de procesos metabólicos relacionados con el crecimiento vegetal (Colla et al., 2015; Rouphael & Colla, 2020). En este contexto, la mejora observada en la absorción nutrimental y en la eficiencia de utilización interna podría estar parcialmente mediada por estos compuestos, lo que ayuda a explicar la respuesta diferencial entre tratamientos, particularmente en aquellos con mayor concentración de *N. vigensis*.

Existe una alta correlación positiva entre el Na en raíz y el balance parcial de nutrientes ($r > 0.73$; $p \leq 0.01$), lo cual sugiere que la acumulación nutrimental en la parte aérea se

incrementa conforme aumenta el Na en la raíz. Sin embargo, este comportamiento podría estar influenciado por un efecto indirecto, ya que el medio de cultivo BBM utilizado para el crecimiento de *N. vigensis* contiene sodio, el cual puede ser acumulado en las células microalgales. En este sentido, es posible que la microalga se haya adherido a la superficie de las raíces, lo que pudo haber influido en la cuantificación del Na en el tejido radical, donde se registraron valores de 0.33 % en comparación con 0.16 % en el testigo, siendo estadísticamente diferentes. Por lo tanto, se sugiere que el contenido de sodio en raíz pudo haber estado parcialmente sobreestimado por la presencia de la microalga. Este comportamiento podría estar asociado a interacciones microalga-raíz, ya que se ha reportado que microalgas pueden establecer asociaciones en la rizosfera y adherirse a superficies radicales, formando consorcios que influyen en la dinámica nutrimental (Khan et al., 2009; Renuka et al., 2018). Asimismo, este tipo de interacción podría reflejar una relación tipo mutualista o promotor, en la cual *N. vigensis* podría contribuir con nutrimentos, aminoácidos u otros compuestos bioactivos que influyen en la respuesta del cultivo.

El análisis de componentes principales (PCA) mostró que los dos primeros componentes explicaron el 81.3 % de la variación total (Figura 11). El CP1 (48.9 %) estuvo asociado principalmente con variables de crecimiento y balance parcial de nutrimentos (PB), así como con la acumulación nutrimental, agrupando a los tratamientos con mayor concentración de *N. vigensis* (0.42 g L^{-1}), lo que confirma que la respuesta del cultivo estuvo determinada por una mayor captación nutrimental. Por otro lado, el CP2 (32.4 %) permitió diferenciar variables relacionadas con nutrimentos en raíz y eficiencias de utilización interna. En este sentido, la eficiencia de utilización interna de Mn (EIMn) se asoció con los tratamientos sin suspensión de *N. vigensis*, los cuales presentaron los valores más altos de este índice, lo que indica una menor eficiencia en el uso de Mn. Sin embargo, de acuerdo con el concepto de eficiencia de utilización interna, valores más bajos indican un uso más eficiente del nutrimento, por lo que los tratamientos con mayor concentración (0.42 g L^{-1}) presentaron una mejor eficiencia en el uso de Mn. Esto sugiere que, aunque la planta absorbió Mn de la solución nutritiva, su utilización interna no fue eficiente, lo que limitó la respuesta en crecimiento. El Mn desempeña un papel fundamental en la fotosíntesis, además de participar en la activación de enzimas y en

procesos metabólicos claves relacionados con el crecimiento vegetal (Lambers, 2023; Millaleo et al., 2010). Asimismo, las raíces muy finas (RMF) se agruparon con nutrientes en raíz, lo que refuerza su papel en la absorción nutrimental. En conjunto, el PCA confirma que el efecto de la suspensión de *N. vigensis* estuvo principalmente relacionado con la absorción nutrimental y su traslocación en la planta.

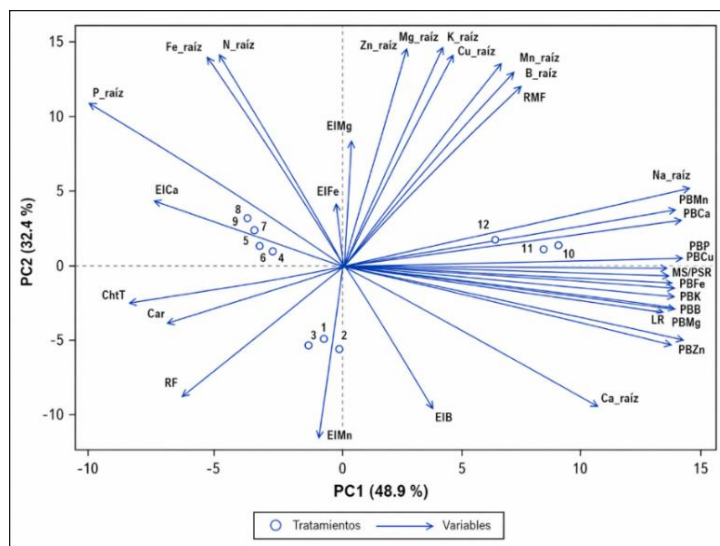


Figura 11. Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de crecimiento, sistema radical, pigmentos, nutrientes en raíz, balance parcial de nutrientes y eficiencia de utilización interna en genotipos de *Solanum lycopersicum* L. tratadas con diferentes concentraciones de *Neochloris vigensis*. CP1 y CP2 explican el 48.9 y 32.4 % de la variación total, respectivamente (acumulada 81.3 %). 1: T1; 2: T2; 3: T3; 4: T4; 5: T5; 6: T6; 7: T7; 8: T8; 9: T9; 10: T10; 11: T11; 12: T12.

En conjunto, estos resultados indican que el efecto de la aplicación de *N. vigensis* en el sistema de producción en balsa flotante estuvo determinado principalmente por una mayor captación nutrimental, favorecida por cambios en la arquitectura radical, particularmente en la formación de raíces muy finas, por lo tanto, se favorece la absorción y la eficiencia de utilización interna, principalmente de Mn, seguido de Zn y B.

Conclusiones

La aplicación de la suspensión de *N. vigensis* en condiciones de balsa flotante aumentó el crecimiento, la acumulación de nutrientes y la eficiencia de uso de nutrientes en genotipos de *Solanum lycopersicum* L. a los 25 DDT. La concentración de 0.42 g L⁻¹ promovió los mayores valores de biomasa y extracción nutrimental. Los resultados

obtenidos indican que la suspensión de *N. vigensis* actúa como un bioestimulante cuyo efecto principal está asociado con una mayor formación de raíces muy finas, lo que favorece la absorción y acumulación de nutrimentos y mejora la eficiencia de utilización interna de Zn, Mn y B posiblemente asociados con la presencia de compuestos orgánicos como aminoácidos en la suspensión de la microalga.

Literatura citada

- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology* (2nd ed.). CRC Press.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7–8), 921–950. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>
- Bajic, D., & Sanchez, A. (2020). The ecology and evolution of microbial metabolic strategies. *Current Opinion in Biotechnology*, 62, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.003>
- Böhm, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8>
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677–702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
- Brown, P. H., Bellaloui, N., Wimmer, M. A., Bassil, E. S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeiffer, H., Dannel, F., & Römheld, V. (2002). Boron in plant biology. *Plant Biology*, 4(2), 205–223. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25740>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Colla, G., Nardi, S., Cardarelli, M., Ertani, A., Lucini, L., Canaguier, R., & Rouphael, Y. (2015).

Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 28–38.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>

Comas, L. H., Becker, S. R., Von Mark, V. C., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, Article 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>

Dehkordi, R. A., Roghani, S. R., Mafakheri, S., & Asghari, B. (2021). Effect of biostimulants on morpho-physiological traits of fenugreek under water deficit stress. *Scientia Horticulturae*, 283, Article 110077. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110077>

Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2011). The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of Plant Nutrition*, 34(7), 1121–1157. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555578>

Freschet, G. T., Roumet, C., Comas, L. H., Weemstra, M., Bengough, A. G., Rewald, B., Bardgett, R. D., De Deyn, G. B., Johnson, D., Klimešová, J., Lukac, M., McCormack, M. L., Meier, I. C., Pagès, L., Poorter, H., Prieto, I., Wurzburger, N., Zadworny, M., & Mommer, L. (2021). Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning. *New Phytologist*, 232(3), 1123–1158. <https://doi.org/10.1111/nph.17072>

Gutiérrez Castorena, M. del C. (2024). *Manual para la descripción de perfiles de suelos*. Colegio de Postgraduados.

Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321, 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>

- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Lambers, H. (2023). Nutrient-use efficiency. En Z. Rengel, İ. Çakmak, & P. J. White (Eds.), *Marschner's mineral nutrition of plants* (4th ed., pp. 651–664). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00007-1>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV–VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4.3.1–F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., & Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), 470–481. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>
- Moll, R. H., Kamprath, E. J., & Jackson, W. A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74(3), 562–564. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>
- O'Callaghan, M. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*, 38, 1340–1369. <https://doi.org/10.1111/sum.12811>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2019). Reglamento (UE) 2019/1009. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 170, 1–114.
- Quille, P., Kacprzyk, J., O'Connell, S., & Ng, C. K. Y. (2025). Reducing fertiliser inputs: plant biostimulants as an emerging strategy to improve nutrient use efficiency. *Discover Sustainability*, 6, Article 128. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00910-w>

- Renuka, N., Guldhe, A., Singh, P., & Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.004>
- Marschner, P., & Rengel, Z. (2023). Nutrient availability in soils. In Z. Rengel, İ. Çakmak, & P. J. White (Eds.), *Marschner's mineral nutrition of plants* (4th ed., pp. 499–522). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00003-4>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020a). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants. *Agronomy*, 10(10), Article 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020b). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Bonini, P., & Colla, G. (2017). Synergistic action of a microbial-based biostimulant and a plant-derived protein hydrolysate enhances lettuce tolerance to alkalinity and salinity. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 131. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00131>
- SAS Institute Inc. (2013). *SAS/STAT® 9.4 user's guide*. SAS Institute Inc.
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.

CAPÍTULO 5. Aplicación de *Neochloris vigensis* Archibald sobre el crecimiento, calidad del fruto y rendimiento de *Solanum lycopersicum* L.

Resumen

Las microalgas son utilizadas como bioestimulantes en la agricultura al incrementar el crecimiento y la productividad de los cultivos. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de la suspensión de *Neochloris vigensis* sobre el crecimiento de plantas y la calidad y rendimiento de fruto en híbridos de *Solanum lycopersicum* L. El experimento se estableció en invernadero bajo un sistema hidropónico. Se evaluaron tratamientos generados a partir de cinco combinaciones de aplicación de *N. vigensis* (que integran la concentración y método de aplicación: foliar y drench) y cinco genotipos, lo que generó 25 tratamientos. Se empleó un diseño experimental en franjas divididas con tres repeticiones. La aplicación de *N. vigensis* incrementó el rendimiento a través del aumento del peso y número de frutos, sin modificar el desarrollo de la planta. Los dos métodos de aplicación tuvieron la misma eficiencia a través de las concentraciones y métodos de aplicación ensayados. La aplicación de *N. vigensis* incrementó el rendimiento de fruto en 2.6 kg m⁻² ($\alpha \leq 0.05$); es decir, 27.5 % con respecto al testigo, lo cual indica que la aplicación de esta microalga en concentraciones de 0.10 y 0.50 g L⁻¹ (vía foliar) y de 0.42 y 0.70 g L⁻¹ (vía drench) representa una alternativa viable en sistema de producción de tomate bajo invernadero.

Palabras clave: bioestimulante, hidroponía, rendimiento, calidad del fruto, suspensión microalgal.

Sometido a: No sometido a ninguna revista

Estado: No publicado

Introducción

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos con alta capacidad de adaptación y producción de biomasa rica en compuestos de interés biotecnológico. Su relevancia en la agricultura radica en su potencial para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos mediante la síntesis de metabolitos bioactivos, tales como fitohormonas, aminoácidos y compuestos antioxidantes (Cabanelas et al., 2016; Grubišić et al., 2019; Wen et al., 2016). En el ámbito agrícola, la aplicación de suspensiones de microalga favorece el desarrollo vegetal al incrementar el rendimiento y mejorar la calidad del fruto, particularmente en variables como los sólidos solubles, firmeza y contenido de compuestos bioactivos (Marín-Marín et al., 2024; Grubišić et al., 2019). Estos efectos se atribuyen a la interacción de compuestos presentes en las microalgas, como auxinas, citocininas y giberelinas, que regulan la división y elongación celular, así como aminoácidos; como el triptófano, que actúan como precursores de otras fitohormonas, y compuestos antioxidantes como carotenoides y compuestos fenólicos, los cuales participan en la mitigación del estrés oxidativo. En conjunto, estos compuestos influyen en procesos fisiológicos y metabólicos como la fotosíntesis, absorción de nutrientes, actividad enzimática y tolerancia al estrés abiótico (Bhuyar et al., 2020; Khan et al., 2009; Sharma et al., 2014).

La aplicación de microalgas a los cultivos puede realizarse mediante aplicaciones foliares o al suelo, lo que permite modular su efecto sobre el cultivo (Marks et al., 2017; Mostafa et al., 2024). Esta respuesta varía de acuerdo con el genotipo y las condiciones de aplicación, lo que resulta necesario evaluar de manera conjunta estos factores para comprender su efecto sobre el crecimiento y la productividad. Diversos estudios en *Solanum lycopersicum* L. han documentados mejoras con el uso de microalgas como *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, *Arthrospira platensis* y *Scenedesmus* spp., principalmente en forma de extractos, los cuales han mostrado efectos positivos en el rendimiento, incluyendo incrementos en el número y peso de frutos. Asimismo, se han documentados mejoras en la calidad del fruto, tales como mayores contenidos de sólidos solubles, firmeza y compuestos bioactivos. A nivel fisiológico, su aplicación se ha asociado con aumentos en el contenido de clorofila, la tasa fotosintética y la actividad de enzimas antioxidantes, además de favorecer la absorción y acumulación de nutrientes

esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (García-González & Sommerfeld, 2016; Khan et al., 2009; Sharma et al., 2014;). No obstante, el uso de biomasa o suspensión de microalgas ha sido menos estudiado en comparación con los extractos, a pesar de su potencial para aportar compuestos bioactivos y nutrimentos. En este contexto, la información disponible sobre la aplicación de *N. vigensis* en forma de suspensión es limitada, por lo que resalta su importancia de evaluar en este sistema de producción. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del tipo de aplicación y la concentración de suspensión microalgal de *Neochloris vigensis* sobre el crecimiento, calidad del fruto y el rendimiento en diferentes genotipos de *Solanum lycopersicum* L., con el fin de determinar su impacto en la productividad del cultivo.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en un invernadero de tecnología media, tipo Full Vent, cubierto con plástico con transmitancia del 80 %, ubicado en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (19°29' N, 98°53' O; 2250 m.s.n.m.) durante los meses de mayo a septiembre de 2025. Se usó un sistema hidropónico con solución nutritiva $\text{NH}_4^+ = 1.25$; $\text{Ca}^{2+} = 7.56$; $\text{Mg}^{2+} = 4.68$; $\text{K}^+ = 6.34$; $\text{NO}_3^- = 12.52$; $\text{SO}_4^{2-} = 6.40$; $\text{H}_2\text{PO}_4^- = 1.08 \text{ mEq L}^{-1}$, respectivamente y además de $\text{Fe} = 3.64$; $\text{Cu} = 0.20$; $\text{Zn} = 0.48$; $\text{Mn} = 1.20$; $\text{Mo} = 0.10 \text{ mg L}^{-1}$, utilizando tezontle como sustrato. Las plantas fueron cosechadas hasta el quinto racimo a los 160 días después de trasplante (DDT).

Se empleó la microalga *Neochloris vigensis* (FP01; número de acceso PZ323027), la cual fue aislada a partir de una muestra de agua del río Lerma, comunidad de El Capulín, Salamanca, Guanajuato, México. Las coordenadas de recolección de la muestra fueron 20°16'13.3" N 100°59'05.3" O, y fue cultivada en medio de cultivo BBM (Barsanti y Gualtieri, 2014) en condiciones de agitación constante mediante aireación por burbujeo a temperatura ambiente y con un fotoperiodo de 12 h con una intensidad luminosa promedio de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (MQ-610, Apogee Instruments, Logan, UT, USA).

El primer factor de estudio correspondió a las combinaciones de dosis (g L^{-1}) y el método de aplicación (foliar y drench) de *N. vigensis*. A partir de este factor, y el control (sin aplicación) se generaron cinco combinaciones (Cuadro 22). Las aplicaciones se

realizaron cada 15 días en ambas modalidades. La aplicación foliar se realizó con una aspersora eléctrica de 20 L (HYD2020xt, Hyundai®, Corea del Sur) a las 9:30 am.

Cuadro 23. Combinaciones utilizadas en el experimento

Combinación	<i>N. vigensis</i> (g L ⁻¹)	Método de aplicación
1	0.00	Testigo (T)
2	0.10	Foliar (F)
3	0.50	Foliar (F)
4	0.42	Drench (D)
5	0.70	Drench (D)

Se ensayaron cinco genotipos de alto rendimiento de hábito de crecimiento indeterminado (Macizo y Moctezuma de la empresa Harris Moran®; Azovian de Nunhems® y 69/47S8 y 47B1/47S8 del programa de mejoramiento genético de tomate de la UACH) con una densidad de plantación de 3.3 plantas/m².

El diseño de tratamiento fue factorial Genotipo x Combinaciones, lo que generó 25 tratamientos. La unidad experimental estuvo constituida por cinco macetas con dos plantas cada una, conducidas a un solo tallo, las cuales se cosecharon del primero al quinto racimo. El diseño experimental usado fue franjas divididas con tres repeticiones.

Los caracteres evaluados fueron: altura al primer racimo (AR1, en cm), altura al quinto racimo (AR5, en cm), altura de la planta (AP, en m) con una cinta métrica (TFC-50ME, Truper®, México); y con los promedios obtenidos de AR5 y AP se obtuvo la longitud de entrenudos (LE, en cm) y la distancia entre racimos (DR, en cm).

A partir de cuatro frutos cosechados por unidad experimental en estado de madurez comercial se determinó: peso del fruto (PF, g), determinado con una balanza digital (E1B120, OHAUS®, Parsippany, NJ, USA); diámetro polar del fruto (DPF, mm) y el diámetro ecuatorial del fruto (DEF, mm), medidos con un vernier digital (CALDI-6MP, Truper®, México); firmeza del fruto (FIR, kgf cm⁻²), determinada con un penetrómetro tipo analógico (GY-3, LiebeWH, China); rendimiento (kg m⁻²) y número de frutos de tomate. Además, en el fruto se obtuvo la concentración de sólidos solubles totales (SST, en °Brix) con un refractómetro digital (PAL-3, ATAGO®, Japón); vitamina C (VC, en mg 100 g⁻¹), determinada mediante titulación con 2,6-diclorofenolindofenol de acuerdo con

AOAC (2016); acidez titulable (AT, en %), determinada mediante titulación ácido - base con hidróxido de sodio (NaOH) y expresándose como porcentaje de ácido cítrico, de acuerdo con la AOAC (2016).

Adicionalmente se obtuvo el rendimiento acumulado (RENa, en kg m⁻²) para cada combinación (concentración de *N. vigensis* y método de aplicación) y genotipo, realizando mediciones a los 102, 112, 119, 126, 133 y 159 DDT. Los datos se ajustaron a un análisis de regresión no lineal con el modelo exponencial para cada tratamiento:

$$RENa = \beta e^{c \cdot x}$$

donde: RENA = rendimiento acumulado (kg m⁻²); x = días después del trasplante; β = parámetro asociado a la ordenada al origen; c = tasa de crecimiento relativa del carácter (velocidad de acumulación); e = base de logaritmo natural ($e = 2.718281828$).

Se realizaron análisis de regresión, análisis de varianza, comparaciones de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) y contrastes mediante el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

Resultados y discusión

La tasa de crecimiento relativa del rendimiento acumulado (c) en las seis mediciones (102, 112, 119, 126, 133 y 159 DDT) y ajustada a un modelo exponencial no mostró diferencias estadísticas significativas (IC 95 %) (Cuadro 23). En todas las combinaciones, el modelo presentó un nivel de ajuste alto, con valores del coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0.97, por lo que el modelo permitió explicar prácticamente toda la variabilidad observada del rendimiento acumulado (Figura 12a). En consecuencia, ninguna de las combinaciones evaluadas (concentración de *N. vigensis* y método de aplicación), afectó la velocidad de acumulación (c) de rendimiento en *Solanum lycopersicum* en el carácter evaluado (Figura 12b), lo que indica que el patrón de crecimiento del carácter evaluado se mantuvo constante independientemente de la combinación aplicada.

Cuadro 24. Parámetros del modelo exponencial al rendimiento acumulado de *Solanum lycopersicum* L. en función de la combinación de aplicación de *Neochloris vigensis*.

COM	CON	MA	β	LC (β)		c	LC (C)		R^2
				Mín	Máx		Mín	Máx	
1	0.00	T	0.81	0.28	1.35	0.015	0.010	0.020	0.97
2	0.10	F	0.52	0.25	0.80	0.020	0.016	0.023	0.98
3	0.50	F	0.39	0.15	0.62	0.021	0.017	0.025	0.98
4	0.42	D	0.61	0.30	0.93	0.019	0.015	0.022	0.98
5	0.70	D	0.50	0.20	0.81	0.020	0.015	0.024	0.98

COM: combinación; CON: concentración de *N. vigensis* (g L⁻¹); MA: método de aplicación (F = foliar; D = drench); β : parámetro asociado al rendimiento inicial; c : tasa de crecimiento relativa del rendimiento; R^2 : coeficiente de determinación; IC 95 %: intervalo de confianza al 95 %.

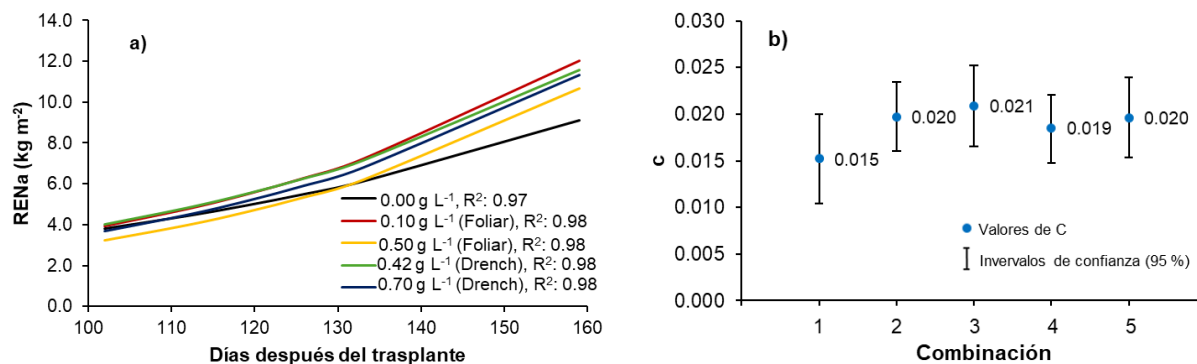


Figura 12. Rendimiento acumulado (RENa) de *Solanum lycopersicum* L. tratadas con diferentes combinaciones de aplicación de *Neochloris vigensis* (a); y parámetro c (tasa de crecimiento relativa del rendimiento) e intervalos de confianza al 95 % para cada combinación (b).

En los híbridos utilizados de *Solanum lycopersicum* la tasa de crecimiento relativa del rendimiento acumulado (c), en las seis mediciones (102, 112, 119, 126, 133 y 159 DDT) y ajustada a un modelo exponencial, no mostró diferencias estadísticas significativas (IC 95 %) (Cuadro 24). En todos los genotipos, el modelo exponencial presentó un alto nivel de ajuste, con valores del coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0.97, por lo que el modelo permitió explicar la variabilidad observada del rendimiento acumulado a través del tiempo (Figura 13a). Esto indica que ninguno de los híbridos evaluados afectó la velocidad de acumulación (c) del rendimiento (Figura 13b) y este se mantuvo constante independientemente del genotipo utilizado.

Cuadro 25. Parámetros del modelo exponencial ajustado al rendimiento acumulado de genotipos de *Solanum lycopersicum* L.

GEN	β	LC (β)		c	LC (C)		R ²
		Mín	Máx		Mín	Máx	
Macizo	0.52	0.24	0.80	0.019	0.015	0.023	0.98
Moctezuma	0.80	0.42	1.17	0.016	0.013	0.020	0.98
Azovian	0.57	0.26	0.89	0.018	0.014	0.022	0.98
69/47S8	0.43	0.13	0.74	0.021	0.016	0.026	0.97
47B1/47S8	0.50	0.20	0.80	0.020	0.016	0.024	0.98

GEN: genotipo; β : parámetro asociado al rendimiento inicial; c: tasa de crecimiento relativa del rendimiento; R²: coeficiente de determinación; IC 95 %: intervalo de confianza al 95 %.

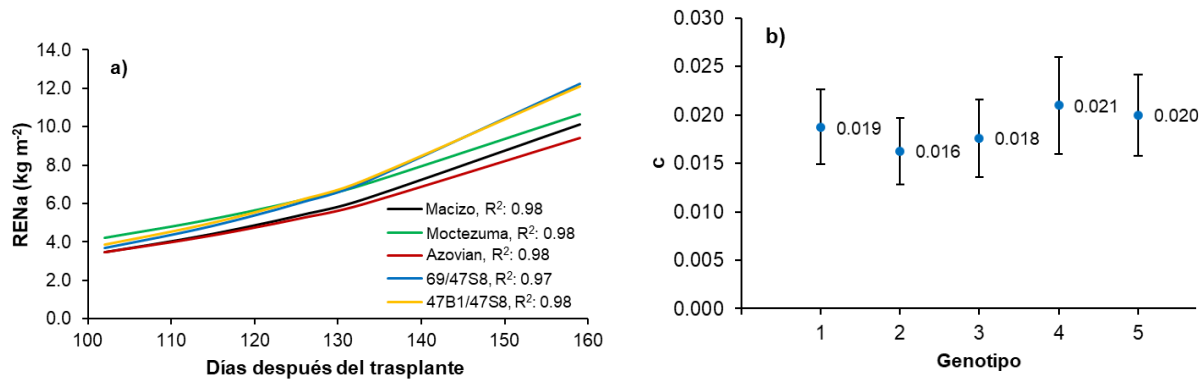


Figura 13. Rendimiento acumulado (RENa) de genotipos de *Solanum lycopersicum* L. (a). Parámetro c (tasa relativa de crecimiento del rendimiento) e intervalos de confianza al 95 % para cada genotipo (b).

De acuerdo con el análisis de varianza, la combinación de la concentración y el método de aplicación de *N. vigensis* modificó el comportamiento ($p \leq 0.01$) del peso, número y rendimiento de frutos del fruto (PF), rendimiento (REN) y en el número de frutos (NF) (Cuadro 27); sin afectar el desarrollo de la planta (AR1, AR5, AP, LE y DR). Los coeficientes de variación fueron menores que 12 %, por lo que se considera que la información es confiable (Cuadro 26).

Cuadro 26. Cuadrados medios de la altura al primer racimo (AR1), altura al quinto racimo (AR%), altura de la planta (AP), longitud de entrenudos (LE) y distancia entre racimos (DR) en *Solanum lycopersicum* L.

FV	GL	AR1	AR5	AP	LE	DR
COM	4	16.51	0.004	0.008	0.18	2.81
BLO	2	14.71	0.040	0.043	1.56	24.94
COMxBLO	8	29.55	0.004	0.007	0.16	2.49

GEN	4	284.60**	0.105**	0.193**	4.11**	65.74**
COMxGEN	16	24.17	0.003	0.007	0.13	2.15
ERROR	40	24.28	0.005	0.008	0.21	3.39
TOTAL	74					
CV		11.72	5.76	5.14	5.76	5.76
MEDIA		42.03	1.28	1.70	7.99	31.97

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; COM: combinación (g L⁻¹ de *N. vigensis* y método de aplicación); BLO: bloque; GEN: genotipo; AR1: altura al primer racimo; AR5: altura al quinto racimo; AP: altura de la planta; LE: longitud de entrenudos; DR: distancia entre racimos; CV: coeficiente de variación; *: significativo con $p \leq 0.05$; **: significativo con $p \leq 0.01$.

Los genotipos (GEN) mostraron efectos significativos en todos los caracteres ($p \leq 0.05$), lo que refleja la influencia del componente genético VC, AT, PF, DPF, DEF, FIR, SST, REN y NF (Cuadro 27). Los coeficientes de variación fueron aceptables en todos los caracteres evaluados ($CV < 14 \%$), con excepción de la firmeza (20 %) (Cuadro 26). La ausencia de interacción significativa entre tratamientos y genotipos sugiere que este efecto fue consistente entre los materiales evaluados, lo que refuerza el potencial de *N. vigensis* para incrementar el rendimiento, sin modificar los patrones de crecimiento de la planta, independientemente del híbrido utilizado. Resultados similares han sido reportados en tomate por García-González y Sommerfeld (2016) y Coppens et al. (2016) quienes obtuvieron incremento en rendimiento y calidad de fruto sin alterar significativamente el patrón de crecimiento de la planta, atribuyendo este efecto a compuestos bioactivos y fitohormonas presentes en las microalgas.

Cuadro 27. Cuadrados medios del análisis de varianza de las características del fruto y variables de rendimiento de *Solanum lycopersicum* L.

FV	GL	VC	AT	PF	DPF	DEF	FIR	SST	REN	NF
COM	4	0.304	0.001	981.0**	29.01	16.67	25.05	0.325	13.4**	1169.53**
BLO	2	0.016	0.007	370.0	10.77	11.91	76.20	2.011	0.08	21.79
COMxBLO	8	0.129	0.003	65.3	8.91	4.46	10.25	0.754	1.23	64.71
GEN	4	0.456**	0.001	3521.3**	139.90**	91.94**	22.9**	0.221**	13.8**	251.21**
COMxGEN	16	0.024	0.001	226.6	11.99	3.98	5.34	0.058	2.14	74.30
ERROR	40	0.040	0.001	230.7	13.91	8.01	6.04	0.050	1.39	63.28
TOTAL	74									
CV		13.86	11.42	11.20	5.48	4.83	20.0	6.74	11.34	8.82
MEDIA		1.44	0.20	135.56	68.06	58.60	12.23	3.30	10.40	90.17

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; COM: combinación (g L⁻¹ de *N. vigensis* y método de aplicación); BLO: bloque; GEN: genotipo; VC: vitamina C; AT: acidez titulable; PF: peso del fruto; DPF: diámetro polar del fruto; DEF: diámetro ecuatorial del fruto; FIR: firmeza; SST: sólidos solubles totales; REN: rendimiento; NF: número de frutos; CV: coeficiente de variación; *: significativo con $p \leq 0.05$; **: significativo con $p \leq 0.01$.

Estos resultados sugieren que el uso de la suspensión microalgal de *N. vigensis* no implica cambios en el manejo agronómico del cultivo. De acuerdo con la comparación de medias, todas las combinaciones de concentración de *N. vigensis* con el método de aplicación presentaron medias significativamente mayores ($p \leq 0.05$) en el peso del fruto (PF), rendimiento (REN) y número de frutos (NF) en comparación con el testigo (Cuadro 28). *N. vigensis* incrementó el PF, NF y el rendimiento (REN) de fruto en 2.6 kg m⁻² ($\alpha \leq 0.05$); es decir, 27.5 % con respecto al testigo (Figura 14). Se ha reportado que la aplicación de extractos microalgales pueden mejorar la eficiencia fotosintética, la asimilación de nutrientes y la actividad metabólica de las plantas, lo que se traduce en un mayor rendimiento y calidad del fruto (García-Orellana et al., 2016; Marks et al., 2017). Asimismo, el incremento simultáneo en el número y tamaño de los frutos sugiere una mejora en el cuajado, división y expansión celular, procesos asociados con la acción de fitohormonas presentes en microalgas, como auxinas y citocininas (Ronga et al., 2019; Gan et al., 2022).

Cuadro 28. Comparaciones de medias del peso del fruto (PF), rendimiento (REN) y número de frutos (NF) de *Solanum lycopersicum* L.

COM	CON	MA	PF (g)	REN (kg m ⁻²)	NF (frutos m ⁻²)
1	0.00	T	122.07 b	8.95 b	75 b
2	0.10	F	143.74 a	11.41 a	97 a
3	0.50	F	138.40 a	10.09 ab	93 a
4	0.42	D	137.71 a	10.91 a	92 a
5	0.70	D	135.89 a	10.65 a	93 a
DMSH			10.19	1.40	10.15

COM: combinación; CON: concentración (g L⁻¹); MA: método de aplicación. DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

Diversos estudios han evaluado el uso de extractos de microalgas como bioestimulantes en cultivos hortícolas. Por ejemplo, Mostafa et al. (2024) aplicaron extractos de *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris* en plantas de tomate en condiciones de estrés salino,

reportando incrementos en el crecimiento y rendimiento del cultivo. De manera similar, Augšpole et al. (2024) utilizaron extractos hidroalcohólicos de microalgas en tomate y obtuvieron mejoras en la calidad del fruto, particularmente en el contenido de sólidos solubles totales, compuestos fenólicos y en la actividad antioxidante. Marín-Marín et al. (2024), señalaron que estos efectos en la mejora de la calidad del fruto se deben a que las microalgas actúan como bioestimulantes al mejorar diversos procesos fisiológicos en las plantas. Por su parte, Abdel-Raouf et al. (2012), menciona que estos efectos pueden atribuirse a la presencia de compuestos bioactivos tales como fitohormonas, aminoácidos y antioxidantes y otros compuestos bioactivos liberados durante el proceso de elaboración de los extractos de microalgas (Abdel-Raouf et al., 2012). Contrario a lo anterior, en el presente estudio se utilizó una suspensión de *N. vigensis*, obteniendo resultados similares, por lo que el efecto observado no depende exclusivamente de la liberación de compuestos utilizando un disolvente, sino también de la interacción directa de la biomasa de la microalga con la planta, cuyos efectos se manifiestan con mayor frecuencia en procesos fisiológicos y productivos más que en cambios morfológicos (Bulgari et al., 2019; Du Jardin, 2015; García-Orellana et al., 2016; Rouphael & Colla, 2020), especialmente cuando las condiciones de cultivo no son limitantes (Bulgari et al., 2019; Rouphael & Colla, 2020).

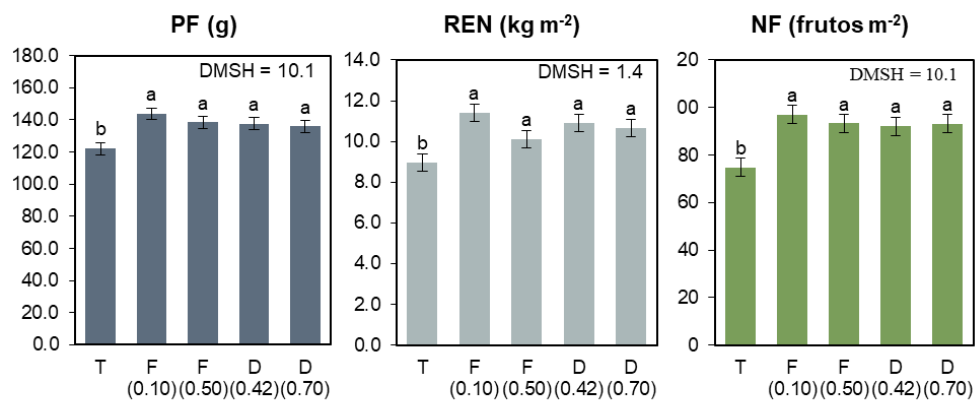


Figura 14. Peso del fruto (PF), rendimiento (REN) y número de frutos (NF) por efecto de la aplicación de *Neochloris vigensis* en *Solanum lycopersicum* L. T = testigo; F = aplicación foliar; D = aplicación en drench al sustrato. Los valores entre paréntesis indican la concentración (g L⁻¹). Barras representan la desviación estándar. Las barras con letras iguales en cada carácter evaluado no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

En la variable AR1, únicamente se detectaron diferencias estadísticas entre 47B1/47S8 y Azovian, donde el híbrido 47B1/47S8 fue 32.6 % superior con respecto a Azovian ($p \leq 0.05$). En AR5, LE, y DR, el híbrido 47B1/47S8 presentó los mayores valores, mientras que 69/47S8 obtuvo los menores, el resto de los híbridos fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) (Cuadro 29). Estas diferencias entre genotipos reflejan la variabilidad genética de los híbridos evaluados (Heuvelink, 2005; Dorais et al., 2008).

Cuadro 29. Comparación de medias de la altura al primer racimo (AR1), altura al quinto racimo (AR5), longitud de entrenudos (LE) y distancia entre racimos (DR) de *Solanum lycopersicum* L.

GEN	AR1 (cm)	AR5 (cm)	AP (m)	LE (cm)	DR (cm)
Macizo	41.19 bc	1.28 b	1.69 bc	7.99 b	31.95 b
Moctezuma	40.59 bc	1.30 b	1.70 b	8.10 b	32.39 b
Azovian	36.56 c	1.25 b	1.61 bc	7.80 b	31.21 b
69/47S8	43.34 ab	1.17 c	1.60 c	7.31 c	29.25 c
47B1/47S8	48.47 a	1.40 a	1.89 a	8.76 a	35.03 a
DMSH	5.14	0.08	0.09	0.48	1.92

GEN: genotipo. DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

Respecto al análisis en fruto de tomate, se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los híbridos evaluados para (FIR), sólidos solubles totales (SST), peso del fruto (PF) y rendimiento (REN) (Cuadro 30). Los híbridos 69/47S8, Azovian y Moctezuma destacaron por su mayor contenido de vitamina C, mientras que en PF y REN, los híbridos 69/47S8 y 47B1/47S8 conformaron el grupo con los mayores valores sin presentar diferencias estadísticas entre sí ($p \leq 0.05$). Asimismo, el diámetro ecuatorial del fruto (DEF), del híbrido 69/47S8 superó estadísticamente a todos los demás híbridos evaluados ($p \leq 0.05$), los cuales fueron estadísticamente iguales. En cuanto a la firmeza, el fruto de Moctezuma fue significativamente menos firme que los frutos de Macizo y 69/47S8, aunque mantuvo una similitud estadística con Azovian y 47B1/47S8. En el análisis de sólidos solubles totales (SST), los híbridos Azovian, Macizo, Moctezuma y 47B1/47S8 fueron estadísticamente iguales entre sí ($p \leq 0.05$), a su vez el híbrido 47B1/47S8 no mostró diferencias significativas respecto a 69/47S8, quien registró el valor más bajo. Este resultado es relevante, ya que los SST reflejan principalmente la

concentración de azúcares y, en menor proporción, de ácidos orgánicos y otros solutos, los cuales son determinantes en la percepción del sabor del fruto (Klee & Tieman, 2018).

Cuadro 30. Comparación de medias de las características del fruto y variables de rendimiento en función del genotipo de *Solanum lycopersicum* L.

GEN	VC (mg 100 g ⁻¹)	PF (g)	DPF (mm)	DEF (mm)	FIR (kgf cm ⁻²)	SST (°Brix)	REN (kg m ⁻²)	NF (frutos m ⁻²)
Macizo	1.33 bc	129.8 bc	67.7 bc	57.7 b	13.33 a	3.39 a	9.79 c	87 ab
Moctezuma	1.48 ab	123.1 c	65.9 c	56.5 b	10.58 b	3.37 a	10.19 bc	95 a
Azovian	1.52 ab	122.8 c	64.5 c	56.8 b	12.40 ab	3.42 a	9.26 c	88 ab
69/47S8	1.67 a	158.4 a	69.9 ab	62.5 a	13.45 a	3.13 b	11.31 ab	87 b
						3.23		
47B1/47S8	1.22 c	143.8 ab	72.1 a	59.4 b	11.41 ab	ab	11.46 a	94 ab
DMSH	0.21	15.8	3.9	2.95	2.56	0.23	1.23	8

GEN: genotipo; VC: vitamina C; PF: peso del fruto; DPF: diámetro polar del fruto; DEF: diámetro ecuatorial del fruto; FIR: firmeza; SST: sólidos solubles totales; REN: rendimiento; NF: número de frutos. DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 31. Contrastes del método de aplicación (MA) de la suspensión microalgal sobre las características fisicoquímicas del fruto y variables de rendimiento de *Solanum lycopersicum* L., evaluado mediante contrastes ($p \leq 0.05$).

MA	VC (mg 100 g ⁻¹)	AT (%)	PF (g)	DPF (mm)	DEF (mm)	FIR (kgf cm ⁻²)	SST (°Brix)	REN (kg m ⁻²)	NF (frutos m ⁻²)
F	1.47 a	0.20 a	141.1 a	69.0 a	59.5 ab	12.37 a	3.33 a	10.75 a	95 a
D	1.54 a	0.21 a	136.8 a	67.7 a	58.5 b	12.92 a	3.35 a	10.78 a	93 a
T	1.20 b	0.20 a	122.1 b	66.8 a	57.0 a	10.58 b	3.17 b	8.95 b	75 b

MA: método de aplicación; F: foliar; D: drench; T: testigo; VC: vitamina C; AT: acidez titulable; PF: peso del fruto; DPF: diámetro polar del fruto; DEF: diámetro ecuatorial del fruto; FIR: firmeza; SST: sólidos solubles totales; REN: rendimiento; NF: número de frutos.

Los contrastes realizados entre los métodos de aplicación (T vs F, T vs D y F vs D) no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en AR1, AR5, AP, LE, DR, mientras que para VC, PF, FIR, SST, REN y NF entre el testigo (T) y los tipos de aplicación sí se obtuvieron diferencias significativas (Cuadro 31). Esto sugiere que la aplicación de la suspensión de *N. vigensis* incrementó la calidad y el rendimiento del fruto de tomate, independientemente de la combinación empleada.

Conclusiones

La aplicación de la suspensión de *N. vigensis* en condiciones hidropónicas incrementó el peso y número de frutos de *Solanum lycopersicum* L., logrando un aumento en el rendimiento de 2.6 kg m⁻² con respecto al testigo. No obstante, este incremento no modificó el patrón de desarrollo del cultivo, independientemente de la concentración y el método de aplicación empleado. Por lo tanto, el uso de *N. vigensis* representa una alternativa viable en sistemas de producción de tomate bajo invernadero.

Literatura citada

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Agricultural importance of algae. *African Journal of Biotechnology*, 11(54), 11648–11658. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3983>
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2016). *Official methods of analysis* (20th ed.). AOAC International.
- Augšpole, I., Sivicka, I., Kampuss, K., Semjonovs, P., & Missa, I. (2024). Biologically active compounds in tomato fruits under the application of water–ethanol *Spirulina*, *Dunaliella* and *Chlorella* microalgae extracts on plants' leaves. *International Journal of Plant Biology*, 15, 1338–1352. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040092>
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology* (2nd ed.). CRC Press.
- Bhuyar, P., Yusoff, M. M., Rahim, M. H. A., Sundararaju, S., Maniam, G. P., & Govindan, N. (2020). Effect of plant hormones on the production of biomass and lipid extraction for biodiesel production from microalgae *Chlorella* sp. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(4), 671–674. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.671-674>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), Article 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Cabanelas, I. T. D., van der Zwart, M., Kleinegris, D. M. M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2016). Sorting cells of the microalga *Chlorococcum littorale* with increased

- triacylglycerol productivity. *Biotechnology for Biofuels*, 9, Article 183. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0595-x>
- Coppens, J., Grunert, O., Van Den Hende, S., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., & De Gelder, L. (2016). The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of Applied Phycology*, 28(4), 2367–2377. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>
- Dorais, M., Ehret, D. L., & Papadopoulos, A. P. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochemistry Reviews*, 7, 231–250. <https://doi.org/10.1007/s11101-007-9085-x>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *FAOSTAT statistical database*. <https://www.fao.org/faostat/>
- Gan, L., Song, G., Wu, Y., Wang, X., Wei, H., Liu, X., Lu, X., & Li, J. (2022). Cytokinins are involved in regulation of tomato pericarp growth by controlling cell division and expansion. *Horticulture Research*, 9, Article uhab041. <https://doi.org/10.1093/hr/uhab041>
- García-González, J., & Sommerfeld, M. (2016). Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 1051–1061. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>
- García-Orellana, Y., Soto, G., Tafur, V., Simbaña, A., Tello, E., & Brito, J. J. (2016). Efecto de un fertilizante orgánico microalgal en la germinación y crecimiento de plántulas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 34, 33–39.
- Grubišić, M., Ivančić Šantek, M., & Šantek, B. (2019). Potential of microalgae for the production of different biotechnological products. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 33(2), 161–181. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2019.1657>
- Heuvelink, E. (Ed.). (2005). *Tomatoes*. CABI Publishing.
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts

- as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Klee, H. J., & Tieman, D. M. (2018). The genetics of fruit flavour preferences. *Nature Reviews Genetics*, 19(6), 347–356. <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0002-5>
- Marín-Marín, C. A., Estrada, J. A., Delgado-Naranjo, J. M., Zapata-Ocampo, P. A., & Peñuela-Vásquez, M. (2024). Cyanobacteria and microalgae as potential sources of biofertilizers: A review. *Actualidades Biológicas*, 46(120), Article e4606. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi/v46n120a06>
- Marks, E., Miñón, J., Pascual, A., Montero, O., Navas, L., & Rad, C. (2017). Application of a microalgal slurry to soil stimulates heterotrophic activity and promotes bacterial growth. *Science of the Total Environment*, 605–606, 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.169>
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. E.-K. B. (2024). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 21181–21191. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04460-x>
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, 9(4), Article 192. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), Article 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
- SAS Institute Inc. (2013). *SAS/STAT® 9.4 user's guide*. SAS Institute Inc.
- Sharma, H. S. S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J. R., & Martin, T. (2014). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology*, 26, 465–490. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9>
- Wen, X., Du, K., Wang, Z., Peng, X., Luo, L., Tao, H., Xu, Y., Zhang, D., Geng, Y., & Li, Y. (2016). Effective cultivation of microalgae for biofuel production: A pilot-scale evaluation of a novel oleaginous microalga *Graesiella* sp. WBG-1. *Biotechnology for Biofuels*, 9, Article 123. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0521-5>