

Impacto de un Fermento de *Sargassum* spp. Sobre Atributos Agronómicos en Plántulas de Chile Jalapeño Sometidas a Salinidad Impact of a *Sargassum* spp. Ferment on Agronomic Attributes on Jalapeño Pepper Seedlings Subjected to Salinity

Verónica Soriano-Puente¹ , Susana González-Morales^{2†} , Armando Robledo-Olivo³ ,
Adalberto Benavides-Mendoza⁴ , Rebeca Casique-Valdés⁴  y Rosa María Rodríguez-Jasso⁵ 

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida; (V.S.P.). ² SECIHTI; (S.G.M.). ³ Laboratorio de Fermentaciones y Biomoléculas, Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos; (A.R.O.). ⁴ Departamento de Horticultura; (A.B.M.), (R.C.V.). Calzada Antonio Narro No. 1923, Col. Buenavista. 25315 Saltillo, Coahuila, México.

⁵ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Grupo de Biorrefinería. Blvd. Venustiano Carranza s/n, Col. República Oriente. 25280 Saltillo, Coahuila, México; (R.M.R.J.).

† Autora para correspondencia: sgonzalezmo@seciht.mx

RESUMEN

La agricultura enfrenta desafíos debido al cambio climático, como la escasez del agua, la degradación del suelo y la salinidad, esta última agravada por el uso excesivo de fertilizantes. La salinidad induce estrés abiótico en las plantas, alterando su metabolismo y afectando su desarrollo. En la búsqueda de alternativas para mitigar el estrés en plantas, los bioestimulantes son una herramienta para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos en condiciones óptimas y de estrés. Actualmente, la macroalga parda *Sargassum* spp. (sargazo) ha registrado arribos masivos en regiones tropicales y subtropicales cuya acumulación impacta en ecosistemas marinos, comunidades costeras y actividades económicas locales. No obstante, el sargazo representa una alternativa potencial en la agricultura como bioestimulante por su contenido de compuestos bioactivos. El objetivo fue evaluar el efecto de la aplicación (foliar y drench) de un fermento líquido elaborado a partir de *Sargassum* spp. sobre atributos agronómicos en plántulas de chile jalapeño sometidas a estrés salino a 100 mM de NaCl incorporados a la solución nutritiva. Los tratamientos vía drench, particularmente a concentración de 2.5% (FD-2.5%) promovieron mejoras significativas en los atributos agronómicos. El tratamiento FD-2.5% incrementó la altura (15%) y el diámetro del tallo (13%); así como la biomasa aérea fresca y biomasa radical seca en 12 y 26% respectivamente, en comparación con el control salino. Por lo tanto, la aplicación en drench del fermento líquido a partir de *Sargassum* spp. puede ser una alternativa que favorece el crecimiento de las plántulas de chile jalapeño sometidas a estrés salino.

Palabras clave: *Capsicum annum*, compuestos bioactivos, estrés abiótico, NaCl, sargazo.

SUMMARY

Agriculture faces challenges due to climate change, such as water scarcity, soil degradation, and salinity, the latter exacerbated by the excessive use of fertilizers. Salinity induces abiotic stress in plants, altering their metabolism and affecting their development. In the search for alternatives to mitigate plant stress, biostimulants have emerged as a tool to improve crop yield and quality under both optimal and stressful conditions. Currently, the brown macroalga *Sargassum* spp. (sargazo) has experienced massive influxes in tropical and subtropical regions, the accumulation of which impacts marine ecosystems, coastal communities, and local economic activities. However, *Sargassum* represents a potential alternative in agriculture as a biostimulant due to its content of bioactive compounds. The objective of this study



Cita recomendada:

Soriano-Puente, V., González-Morales, S., Robledo-Olivo, A., Benavides-Mendoza, A., Casique-Valdés, R., & Rodríguez-Jasso, R. M. (2026). Impacto de un Fermento de *Sargassum* spp. Sobre Atributos Agronómicos en Plántulas de Chile Jalapeño Sometidas a Salinidad. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-14. e2324. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2324>

Recibido: 11 de junio de 2025.
Aceptado: 19 de enero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Marzo de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Juan Pedro Flores Margez

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

was to evaluate the effect of foliar and drench applications of a liquid ferment derived from *Sargassum* spp. on the agronomic attributes of jalapeño pepper seedlings subjected to saline stress, with 100 mM NaCl incorporated into the nutrient solution. Drench treatments, particularly at a concentration of 2.5% (FD-2.5%), significantly improved these attributes. The FD-2.5% treatment increased stem height (15%) and diameter (13%), as well as fresh shoot biomass and dry root biomass by 12% and 26%, respectively, compared with the saline control. Therefore, drench application of the liquid ferment derived from *Sargassum* spp. may represent an alternative to promote the growth of jalapeño pepper seedlings under saline stress.

Index words: *Capsicum annum*, bioactive compounds, abiotic stress, NaCl, *sargassum*.

INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta retos ocasionados por el cambio climático que han provocado escasez del agua, aridez, disminución de la fertilidad del suelo y aunado a esto, el uso irracional de los fertilizantes ha ocasionado salinidad de los suelos (Tarchoun *et al.*, 2024). La salinidad es uno de los principales problemas que dificultan el desarrollo de los cultivos, provocando estrés abiótico y por ende ocasionando modificaciones fisiológicas y bioquímicas en su metabolismo. La salinidad mayor a 4 dS m⁻¹ en la solución del suelo interfiere con la absorción hídrica, induce desbalances iónicos como el Ca, P y K, y compromete procesos fisiológicos esenciales en las plantas como absorción y equilibrio de nutrientes, integridad de las membranas y fotosíntesis (Yang *et al.*, 2025).

El chile jalapeño es el cultivo pungente con mayor producción a nivel nacional, además de ser un cultivo de gran importancia en la gastronomía mexicana (SIAP, 2021). Sin embargo, una de sus limitantes es la sensibilidad a la salinidad (Zamljen, Medic, Hudina, Veberic y Slatnar 2022). Los efectos adversos del estrés salino a lo largo del ciclo biológico de la planta pueden manifestarse en la reducción del vigor vegetativo, clorosis foliar vegetativa, y en condiciones severas como marchitamiento y senescencia prematura. Además, de la acumulación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Wang *et al.*, 2025). En respuesta a esto, las plantas han implementado mecanismos para adaptarse a las condiciones de salinidad (Lúquez, Eyherabide y Petigrosso, 2023), como la homeostasis de las ROS y el incremento en el sistema antioxidante, la compartimentación de iones tóxicos, la biosíntesis de osmolitos y la homeostasis de iones (Kashyap, *et al.*, 2020).

En este sentido, se han buscado diversas alternativas que ayuden a mitigar el estrés salino en las plantas, una de ellas es la aplicación de bioestimulantes. Éstos son cualquier sustancia o microorganismo con capacidad de estimular el crecimiento, mejorar la eficiencia nutricional y tolerar el estrés abiótico sin importar su contenido de nutrientes (Boutahiri, Benrkia, Tembeni, Idowu y Olatunji, 2024). Los compuestos bioactivos como los polifenoles, polisacáridos, carotenoides, y aminoácidos presentes en los bioestimulantes participan como activadores de mecanismos de defensa en las plantas, lo que les permite adaptarse ante las condiciones adversas (Mendoza-Morales, Mendoza-González, Mateo-Cid y Rodríguez-Dorantes, 2019).

En las últimas décadas, las costas de diversas regiones tropicales y subtropicales han enfrentado una creciente problemática ambiental y económica derivada de la proliferación masiva de macroalgas pardas del género *Sargassum* spp. Estas acumulaciones atípicas, también conocidas como “mareas marrones” han sido reportadas con mayor frecuencia y magnitud, afectando especialmente al Caribe y Golfo de México (Leal-Bautista *et al.*, 2024). Este fenómeno, ocasionado por el cambio climático, el aumento de la temperatura del agua y el aporte excesivo de nutrientes provenientes de actividades humanas como la agricultura y el turismo ha generado impactos significativos en los ecosistemas marinos, las comunidades costeras y las economías locales (Rodríguez-Martínez, *et al.*, 2020). La proliferación de estas macroalgas en las playas ocasiona alteraciones en los hábitats costeros, como la reducción de la calidad y la disminución del oxígeno en el entorno, lo que afecta a la biodiversidad marina. Además, la descomposición del *Sargassum* en el suelo genera emisiones de gases como el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el amoníaco (NH₃), con consecuencias negativas para la salud pública como dolor de cabeza, irritación ocular y problemas respiratorios (Resiere *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2023).

Es importante señalar que estudios previos han reportado que las algas pardas (*Phaeophyceae*) incluyendo géneros muy conocidos como *Sargassum*, *Ascophyllum*, *Padina* y *Ecklonia*, tienen una función bioestimulante en las plantas, debido a su contenido de reguladores de crecimiento, polisacáridos y polifenoles, lo que conlleva a incrementar las concentraciones endógenas de citoquininas, prolina, antioxidantes y enzimas antioxidantes en las plantas (Calvo, Nelson y Kloepper, 2014). Los efectos positivos de los extractos de algas marinas como el crecimiento, rendimiento y mayor tolerancia a condiciones de estrés abiótico se han documentado en diversos cultivos como

tomate (*Solanum lycopersicum*) (Sariñana-Aldaco, Benavides, Robledo y González (2022); Hernández, Santacruz, Ruiz, Norrie y Hernández, 2014), plántulas de chícharo (*Pisum sativum*) (Hamouda et al., 2023) y en cultivo de okra (*Abelmoschus esculentus*) (Khan et al., 2022). Por otra parte, los métodos convencionales para la extracción de compuestos presentes en las macroalgas generalmente utilizan diferentes solventes orgánicos como hexano, cloroformo, metanol y etanol. Lo anterior conlleva a la generación continua de efluentes a lo largo del proceso, los cuales pueden representar un riesgo potencial para la salud humana y el equilibrio ecológico (Abdul-Khalil et al., 2018). Para reducir el impacto por el uso de solventes, el proceso de fermentación es un método de extracción biológico que transforma compuestos orgánicos de alta complejidad a metabolitos más simples mediante el uso de microorganismos (Paredes-Camacho et al., 2023). Por lo anterior, se llevó a cabo la aplicación foliar y drench de un fermento a partir de *Sargassum* spp. con el objetivo de evaluar atributos agronómicos en plántulas de chile jalapeño sometidas a estrés salino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Producción del Fermento a Partir de *Sargassum* spp.

La macroalga parda *Sargassum* spp. fue recolectada en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Fue lavada tres veces con agua corriente para eliminar el exceso de arena. Se secó al aire libre y al sol directo durante 48 h para luego ser molida en una licuadora (Osterizer, USA) a baja velocidad (3000 rpm), posteriormente se realizó un tamizaje hasta obtener una distribución del tamaño de partícula menor a 0.5 milímetros.

El proceso de fermentación y análisis bioquímicos se realizaron en el Laboratorio de Fermentaciones y Biomoléculas del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México con coordenadas 25° 21' 21.1" N; 101° 02' 07.1" O.

Para el proceso de fermentación se utilizó la cepa M4 de *Aspergillus niger* (código KY825168.1), propiedad del Laboratorio de Fermentaciones y Biomoléculas. La conservación de la cepa M4 consistió en mantener las esporas a -20 °C en un crioprotector a partir de 5% de leche descremada con 10% de glicerol. Para la reactivación de la cepa M4 se utilizó un medio de cultivo de agar papa dextrosa (PDA) (BD, Bioxon®) donde se mantuvo a 30 °C en una incubadora de cultivo (Riossa serie E-33, México) durante 8 días. La fermentación en medio líquido se realizó con medio Czapeck-Dox modificado, compuesto por extracto de levadura (Bioxon®) (7.63 g L⁻¹); KH₂PO₄ (Jalmek Scientific®) (3.04 g L⁻¹); MgSO₄ (Jalmek Scientific®) (1.52 g L⁻¹) y KCl (Jalmek Scientific®) (1.52 g L⁻¹). Se añadieron 50 mL del medio Czapeck-Dox modificado en matraces Erlenmeyer de 250 mL de capacidad y se agregaron 5 g de *Sargassum* spp. Posteriormente se agregó una concentración de 1x10⁶ esporas de *A. niger* M4. Los matraces estuvieron en incubación en un agitador orbital (Incubadora Innova 44, New Brunswick Scientific Co., Inc., Edison, NJ, USA) a temperatura de 30 °C y 150 rpm durante 192 h, pasado ese tiempo el líquido fermentado se recuperó mediante filtración con una bomba de vacío (BIOBASE-GM-0.50A) y se congeló a -20 °C para posteriores análisis.

Caracterización del Fermento

En el proceso de la fermentación se realizaron cinco muestreos, a las 0, 48, 96, 144 y 192 h, de cada muestreo se evaluaron tres réplicas, a las cuales se les determinó la concentración de azúcares reductores, polifenoles totales, flavonoides, proteínas, actividad antioxidante ABTS y DPPH y biomasa fúngica.

Los azúcares reductores se determinaron con la metodología descrita por Miller (1959). En tubos de ensayo se agregaron 0.5 mL del fermento líquido seguido de 0.5 mL de ácido dinitrosalicílico (DNS), posteriormente se pasaron a un baño en ebullición por 5 min, pasado el tiempo se le adicionaron 4 mL de agua destilada y se agitaron en vortex, se transfirieron a pocillos de microplacas (BIOBASE-EL-10A) y se tomaron las lecturas a longitud de onda de 540 nm. Los resultados se expresaron en gramos equivalentes de glucosa por litro de fermento (g L⁻¹).

El contenido de proteínas totales se determinó empleando la técnica de Bradford (1976) con ligeras modificaciones. Se colocaron 50 µL del fermento líquido seguidos de la adición de 2.5 mL del reactivo Bradford, y posteriormente se dejó en reposo durante 5 min y se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro (Velab-8000A) a 595 nm. Los resultados se reportaron en miligramos por litro de fermento (mg L⁻¹).

Los flavonoides totales se cuantificaron siguiendo el método de Zhishen, Mengcheng y Jianming (1999). La determinación se llevó a cabo depositando 250 µL del fermento líquido en tubos de ensayo, para después agregar 75 µL de NaNO₂ al 5% y se agitó mediante vortex, se dejó reposar durante 5 min, posteriormente se agregaron 150 µL de AlCl₃ al 10%, seguido de la adición de 500 µL de NaOH 1M y se completó con 2.025 mL de agua destilada. La absorbancia fue medida a 510 nm en un espectrofotómetro (Velab-8000A). Los flavonoides se expresaron en miligramos equivalentes de catequina por mililitro de fermento (mg EC mL⁻¹).

Los compuestos fenólicos se determinaron siguiendo la metodología descrita por Singleton Orthofer y Lamuela (1999) con algunas modificaciones utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu. Se colocaron 50 μL del extracto, se agregaron 200 μL del reactivo de Folin Ciocalteu 1M, seguido de la adición de 500 μL de carbonato de sodio al 20%, se añadieron 5 mL de agua destilada, se dejó reposar durante 30 min a temperatura de 45 °C y se leyó la absorbancia a 750 nm. Los compuestos fenólicos se cuantificaron mediante una curva estándar de ácido gálico ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_5$) y los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por mililitro del fermento (mg GAE mL^{-1}).

La capacidad antioxidante hidrofílica por ABTS fue determinada por la capacidad inhibitoria del radical 2, 2' azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) de acuerdo con Charles-Rodríguez *et al.* (2020). El radical se obtuvo a partir de la reacción de ABTS a 7 mM con persulfato de potasio (2.45 mM) durante 16 h a temperatura ambiente en la oscuridad. En seguida, en una placa de 96 pocillos se colocaron 10 μL del fermento líquido y 200 μL de la solución ABTS, se homogeneizaron y se mantuvieron en oscuridad por 10 min. Pasado el tiempo se midió la absorbancia a 750 nm en un lector de microplaca (BIOBASE EL-10-A). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes a Trolox por mililitro de fermento (mg TE mL^{-1}).

La capacidad antioxidante por DPPH fue determinada adaptando la metodología descrita por Charles-Rodríguez *et al.* (2020), la cual consistió en colocar en una placa de 96 pocillos 25 μL del fermento líquido y 200 μL de la solución DPPH, se homogeneizaron y se mantuvieron en oscuridad por 30 min. Pasado el tiempo se midió la absorbancia a 520 nm en un lector de microplaca (BIOBASE EL-10-A). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes a Trolox por mililitro de fermento (mg TE mL^{-1}).

La biomasa obtenida después de la filtración se determinó de forma indirecta según Blix *et al.* (1948) con algunas modificaciones. La medición fue mediante la liberación de glucosamina. En tubos de ensayo con tapa de rosca se colocaron 100 mg de muestra seca (sargazo + células microbianas) seguido de la adición de 5 mL de H_2SO_4 5N, se agitaron durante 15 min y se centrifugaron a 5000 rpm por 10 min, se retiró el sobrenadante y el precipitado fue lavado dos veces por 5 mL de agua destilada, posteriormente se agregaron 100 μL de HCl 10M y se dejó reposar por 16 h, pasado este tiempo se agregaron 4 mL de agua destilada y se esterilizó en autoclave a 121°C y 15 psi durante 2 h. Del líquido obtenido se tomaron 200 μL y se colocaron en tubos de ensayo, después se agregaron 200 μL de solución A (1 mL de acetilacetona en Na_2CO_3 0.5 N) los tubos se taparon y se pasaron a baño María (96 °C) por 20 min, pasado el tiempo se enfriaron a temperatura ambiente y se agregaron 2 mL de etanol al 96% y 200 μL de la solución B (0.8 g de *p*-dimetilamino benzaldehído en 30 mL de solución HCl:EtOH (1:1). Finalmente, los tubos se agitaron en vortex y se dejaron reposar por 50 min y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Velab-8000A) a 530 nm. Los resultados se reportaron en miligramos de biomasa fúngica por gramo de muestra seca (sargazo + células microbianas) (mg g^{-1}).

Material Vegetal y Condiciones del Experimento

El experimento se realizó en el Laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, México. Se utilizó una cámara de crecimiento con temperatura de 25 °C y un fotoperiodo lumínico ($\text{PAR } 65.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de 14 h inducido por lámparas LED de luz blanca. Se usaron semillas de chile jalapeño (*Capsicum annuum*) híbrido Durango F1 (Starseeds International Inc., Puebla, México), las cuales fueron depositadas en charolas de 200 cavidades usando como sustrato una mezcla de peat moss y perlita (1:1). Cuando las plántulas presentaron seis hojas verdaderas se trasplantaron en contenedores de poliestireno expandido de 0.5 L.

El riego fue de forma manual, agregando a cada planta 80 mL de solución nutritiva (Steiner, 1961) al 25 %, empleando los fertilizantes KNO_3 , CaNO_3 , MgSO_4 , KH_2SO_4 , micronutrientes y H_2SO_4 para ajustar el pH a 6.5 de la solución.

Diseño Experimental y Tratamientos

El diseño fue completamente al azar con ocho tratamientos y seis repeticiones por tratamiento, el experimento se llevó a cabo durante 40 DDT (días después del trasplante). Se evaluaron tres concentraciones del fermento de *Sargassum* spp. (0.5, 1.5 y 2.5%) en dos formas de aplicación (foliar y drench), además de un control salino (sin aplicación del fermento, solo NaCl) y un control absoluto (sin fermento y sin NaCl). Los tratamientos con aplicación de forma foliar se hicieron con un aspersor hasta llegar al punto de goteo y los tratamientos de forma drench se aplicaron 3 mL del fermento a cada plántula con una jeringa de plástico en la base del tallo. La aplicación de los tratamientos fue al momento del trasplante y a los 10, 20 y 30 DDT. El estrés salino inició a los 15 DDT mediante la incorporación de 100 mM de NaCl en la solución nutritiva, los riegos se daban de forma manual cada tercer día durante todo el experimento.

Atributos Agronómicos Evaluados

La altura (cm) de la plántula se midió cada 10 días hasta los 40 DDT, desde la base del tallo hasta el último ápice foliar con un flexómetro magnético (Pretul modelo PRO-8ME) de ocho metros. El conteo de número de hojas fue cada 10 días hasta los 40 DDT de forma directa en la planta. El diámetro (mm) del tallo se midió cada 10 días hasta los 40 DDT con un calibrador vernier digital (modelo HER-411, Steren). La longitud (cm) de raíz se tomó a los 40 DDT utilizando un flexómetro magnético (Pretul modelo PRO-8ME). El peso (g) de la biomasa fresca de aérea y de raíz por planta se tomó a los 40 DDT utilizando una balanza granataria (SPX2202, OHAUS, Inc., NJ, USA). Para el peso (g) de biomasa aérea y de raíz seca, se separaron las hojas y el tallo de la raíz, posteriormente se guardaron en bolsas de papel y se secaron en un horno (Lindberg Blue M modelo Go1350C-1) a 70 °C por 72 h, para luego medir el peso en una balanza granataria.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de (LSD) de Fisher ($p \leq 0.05$) con el paquete estadístico Infostat versión 2016 (Di Rienzo et al., 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del Fermento a Partir de *Sargassum* spp.

Durante la fermentación en medio líquido de *Sargassum* spp. utilizando el hongo *Aspergillus niger*, se observó disminución progresiva de los azúcares reductores a partir de las 48 h (Figura 1a), en el tiempo 0 h se observó una concentración de $484.3 \pm 6.22 \text{ g L}^{-1}$ incrementándose de forma significativa a medida que transcurre el tiempo hasta $649.3 \pm 10.92 \text{ g L}^{-1}$ a las 48 h, lo que sugiere liberación de azúcares, probablemente derivado de la hidrólisis de polisacáridos presentes en el sargazo, estos azúcares son rápidamente consumidos como fuente de carbono y energía para que *A. niger* realice su actividad metabólica y la producción de compuestos bioactivos (Paredes-Camacho et al., 2023). Posteriormente, se observó disminución continua en la concentración de azúcares reductores, registrándose $432.0 \pm 6.32 \text{ g L}^{-1}$ a las 96 h y $362.8 \pm 8.47 \text{ g L}^{-1}$ a las 144 h, lo que indicó un consumo progresivo de estos compuestos. El ligero incremento en la concentración de azúcares a las 192 h está relacionado con una lisis celular o degradación de componentes celulares, liberando nuevamente componentes reductores al medio.

Aspergillus niger tiene la capacidad de producir enzimas como celulasas, xilasas y amilasas, estas ayudan a degradar macromoléculas complejas como los polisacáridos en azúcares más simples como la glucosa (Zheng et al., 2024).

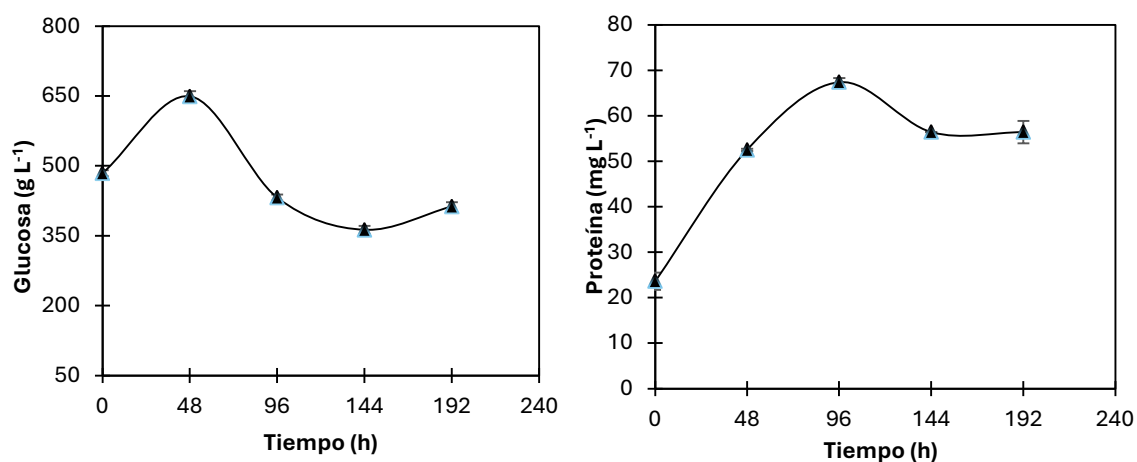


Figura 1. Cinética de consumo de azúcares reductores (a) y contenido de proteína (b) por *Aspergillus niger* M4, en un fermento líquido a partir de *Sargassum* spp.
Figure 1. Kinetics of consumption of reducing sugars (a) and protein content (b) by *Aspergillus niger* M4, in a liquid ferment from *Sargassum* spp.

En el contenido de proteínas (Figura 1b) en el transcurso de la cinética de fermentación, el valor más alto fue de $67.44 \pm 0.09 \text{ mg L}^{-1}$ a las 96 h; posteriormente, se observó disminución del contenido a las 144 h ($56.44 \pm 0.00 \text{ mg L}^{-1}$). Las algas marinas tienen compuestos bioactivos como polifenoles, polisacáridos, vitaminas y proteínas; sin embargo, su composición puede ser diferente dependiendo de la estación del año en que se recolecte, la fase del ciclo de vida, la zona y la especie (Mouga *et al.*, 2025). En este sentido, el aumento de proteínas está asociado con la producción de biomasa fúngica a partir de un metabolismo activo (Kalaiselvan *et al.*, 2025). La actividad de enzimas extracelulares que hidrolizan polímeros estructurales y reservas del sustrato en unidades más simples como oligómero y monómeros facilitando la asimilación de carbono y nitrógeno, lo que favorece la síntesis de proteínas (Bonilla-Loaiza *et al.*, 2022). Estos compuestos en combinación con los metabolitos solubles del proceso pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes como Ca, P, K y N (Ali, Ramsubhag y Jayaraman, 2021) y estimular el sistema antioxidante enzimático y no enzimático en las plántulas, e inducir el mecanismo de defensa ante condiciones de estrés (Sariñana-Aldaco *et al.*, 2021).

La mayor producción de flavonoides en el fermento de *Sargassum* spp. (Figura 2a) se presentó a las 48 h y 192 h (4.90 ± 0.03 y $4.83 \pm 0.04 \text{ mg EC mL}^{-1}$) respectivamente. El incremento inicial coincide con la fase exponencial del crecimiento del hongo, período en el cual se expresa la mayor actividad; además, las algas pardas poseen de manera natural estos compuestos (Paredes-Camacho *et al.*, 2023), los cuales pueden ser liberados por la acción de enzimas extracelulares como celulasas, xilanasas o β -glucosidasas producidas por *A. niger* que durante su fase de crecimiento y adaptación promueven la liberación de flavonoides, polisacáridos y compuestos fenólicos (Carreira-Casais *et al.*, 2021). La disminución a las 144 h ($3.67 \text{ mg EC mL}^{-1}$) sugiere que parte de estos compuestos pudieron ser degradados por enzimas oxidativas como peroxidasas o lacasas (Li, Xiao, Zhong, Wu y Gao, 2022). El último incremento podría estar relacionado con procesos de autólisis o estrés celular a causa de la viscosidad del medio y que promueve una liberación de metabolitos (Jin, Hu, Wang y Jin, 2021). Por otra parte, los flavonoides presentes en el fermento pueden desempeñar funciones importantes en las plántulas, incluyendo la regulación del crecimiento, activando mecanismos de defensa antioxidante al estrés salino protegiendo a las células vegetales del daño oxidativo al neutralizar ROS (Días, Pinto y Silva, 2021).

El contenido de compuestos fenólicos (Figura 2b) en el tiempo 0 h presentó un valor basal correspondiente a los compuestos fenólicos solubles propios del extracto del alga previo a la inoculación (11.96 ± 0.14); después, aumentó en las primeras 48 h de fermentación ($13.98 \pm 0.11 \text{ mg GAE mL}^{-1}$) y luego disminuyó conforme transcurrió el tiempo. Este aumento podría estar relacionado con la descomposición parcial de la pared celular del sargazo por la actividad enzimática de *A. niger* como β -glucosidasas o celulasas, que facilitan la liberación de fenoles previamente conjugados o ligados a estructuras celulares (Ramírez-Esparza *et al.*, 2025).

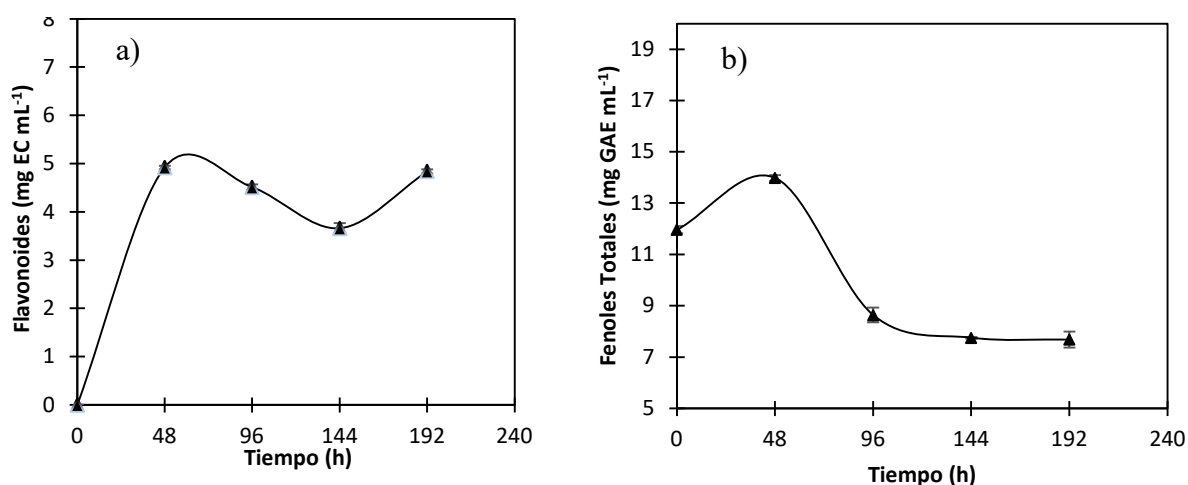


Figura 2. Cinética de producción de flavonoides (a) y fenoles totales (b) por *Aspergillus niger* M4, en un fermento líquido a partir de *Sargassum* spp.

Figure 2. Kinetics of production of flavonoids (a) and total phenols (b) by *Aspergillus niger* M4, in a liquid ferment from *Sargassum* spp.

Después se observó disminución de 38, 44 y 45% de los compuestos fenólicos (8.64 ± 0.28 , 7.75 ± 0.03 y 7.68 ± 0.31 mg GAE mL⁻¹) a las 96, 144 y 192 h, respectivamente. La reducción podría atribuirse a diversos factores como la oxidación, polimerización o metabolización microbiana de los compuestos fenólicos (Liang, Huang, Zhang y Fang, 2023). Estos resultados señalan que las primeras 48 h de fermentación es el rango óptimo para la obtención de mayor contenido de compuestos fenólicos con poder antioxidante. Así mismo, los compuestos fenólicos pueden intervenir en procesos de señalización en las plántulas contribuyendo a neutralizar los radicales libres mediante la donación de electrones o la transferencia de átomos de hidrógeno y estimular mecanismos antioxidantes endógenos que incrementan la actividad de enzimas antioxidantes (Adebo y Medina, 2020).

La capacidad antioxidante ABTS (Figura 3a) mostró una variación a lo largo del tiempo. El valor inicial fue de 118.90 ± 5.18 mg TE mL⁻¹, alcanzando el mayor incremento a las 48 h (139.73 ± 1.2 mg TE mL⁻¹) lo que indicó una alta producción de compuestos antioxidantes en la fase inicial, posiblemente asociado a la actividad metabólica de *A. niger* M4. A partir de las 96 h, la actividad comenzó a disminuir, alcanzando su punto más bajo a las 144 h (96.50 ± 5.51 mg TE mL⁻¹) probablemente por degradación de metabolitos o agotamiento del sustrato (Izábal-Carvajal et al., 2023). Finalmente, a las 192 h se observó una ligera recuperación (117.45 ± 4.05 mg TE mL⁻¹) lo que sugiere liberación tardía de compuestos antioxidantes.

Por otro lado, la capacidad antioxidante DPPH (Figura 3a) registró un comportamiento decreciente a lo largo del tiempo de fermentación. Inicialmente, el fermento presentó un valor de 473.75 ± 6.61 mg TE mL⁻¹, sin embargo, a partir de las 48 h se observó una reducción constante, alcanzando 273.53 ± 4.73 mg TE mL⁻¹ a las 92 h. Esta disminución puede atribuirse a la degradación de compuestos fenólicos o antioxidantes durante el metabolismo microbiano, así como a posibles procesos oxidativos o enzimáticos que disminuyen la disponibilidad de radicales donadores de hidrógeno (Liang et al., 2023). Además, condiciones como el pH entre 3-5.5, la temperatura entre 30-35 °C o el tiempo prolongado superior a 240 h de fermentación pueden beneficiar la polimerización o degradación oxidativa de fenoles, reduciendo su efectividad antioxidante (Liu et al., 2018; Paredes-Camacho et al., 2023). Estos compuestos antioxidantes que contiene el fermento pueden contribuir a la protección de las plántulas en las primeras etapas de desarrollo frente al estrés oxidativo ocasionado por el estrés salino, permitiendo mantener la integridad celular y activando mecanismos de defensa endógena (Hussen y Endalew, 2023).

El crecimiento de *A. niger* M4 (Figura 3b) mostró un crecimiento en las primeras 48 h, evaluado a través de la cuantificación de glucosamina como indicador indirecto de biomasa fúngica. En el tiempo 0 h no se detectó presencia de biomasa (0.00 ± 0.00 mg EG g⁻¹), lo cual es consistente con el inicio de la fermentación. A las 48 h, se registró un aumento significativo en la concentración de glucosamina (13.88 ± 2.17 mg EG g⁻¹), reflejando una fase activa de crecimiento exponencial. Este aumento continuó hasta las 96 h, alcanzando el valor máximo observado (27.73 ± 0.31 mg EG g⁻¹), lo que sugiere que esta etapa representa el punto óptimo de desarrollo fúngico, relacionado a una disponibilidad suficiente de nutrientes y condiciones favorables para la actividad metabólica del hongo.

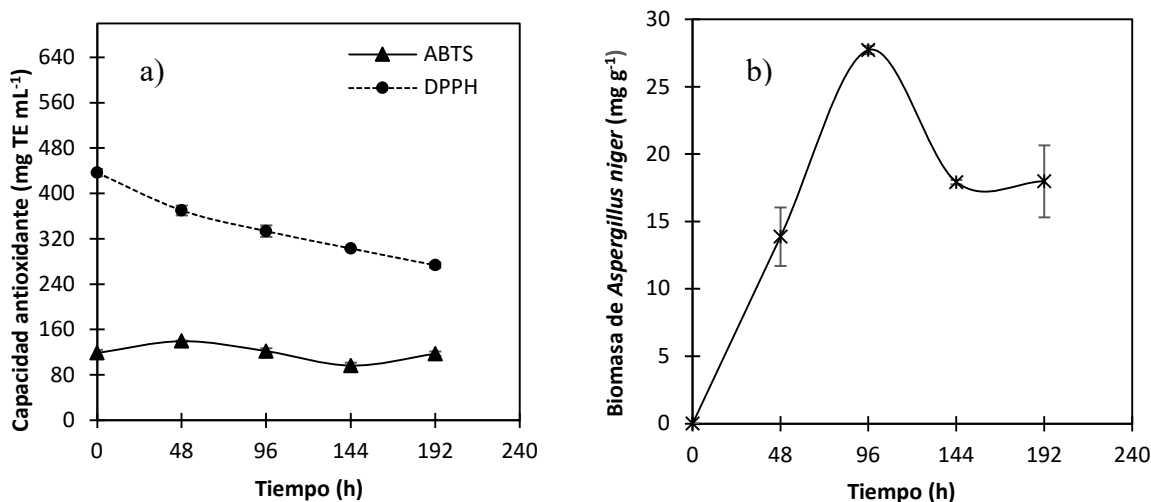


Figura 3. Cinética de la capacidad antioxidante por ABTS y DPPH (a) y biomasa fúngica (b) en un fermento líquido a partir de *Sargassum* spp.

Figure 3. Kinetics of the antioxidant capacity by ABTS-DPPH (a) and fungal biomass (b) in a liquid ferment from *Sargassum* spp.

Posteriormente, entre las 144 y 192 h, se evidenció disminución en la concentración de glucosamina (17.92 ± 0.15 y 17.98 ± 2.67 mg EG g⁻¹) respectivamente, lo que podría estar relacionado con alteraciones en la fase estacionaria o de declive.

Los resultados obtenidos de la caracterización del fermento difieren a los reportados por Paredes-Camacho *et al.* (2023) quienes mencionaron un mayor incremento de compuestos bioactivos a las 96 h de fermentación utilizando *Sargassum* spp. Esto se puede deber a que la composición de las algas cambia con el momento estacional que se cosecha, la zona geográfica y los procedimientos empleados para la obtención de los extractos (Milledge y Harvey, 2016; Devault, Pierre, Marfaing, Dolique y López, 2021). Además, el uso de *A. niger* en sistemas biotecnológicos como las fermentaciones brinda una alternativa eficiente y sustentable para valorizar biomasa como el sargazo que representa un problema ambiental en las playas del Caribe mexicano. Este hongo destaca por su capacidad enzimática para descomponer y liberar compuestos bioactivos (Zheng *et al.*, 2024), como hormonas vegetales, polisacáridos y polifenoles, con potencial bioestimulante para las plantas a diferencia de los métodos convencionales con disolventes orgánicos los cuales pueden representar un riesgo potencial para la salud humana y el medio ambiente (Abdul-Khalil *et al.*, 2018).

Atributos Agronómicos en Plántulas de Chile Jalapeño

Los atributos agronómicos en las plántulas de chile jalapeño como la altura presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos, aumentando de forma gradual con el tiempo en todos los tratamientos evaluados. Sin embargo, el crecimiento y la altura final alcanzada a los 40 DDT se observaron significativamente influenciados por la salinidad y por la concentración del fermento líquido aplicado.

En la Figura 4 se observa que la mayoría de los tratamientos sin importar la vía de aplicación fueron superiores al C-salino (tratamiento solo con aplicación de NaCl); sin embargo, los tratamientos que tuvieron mayor incremento fueron con la aplicación en drench (FD-0.5% y FD-2.5%). Los incrementos fueron del 9 y 15% (20 DDT), 6 y 16% (30 DDT) y 5 y 14% (40 DDT) respectivamente, comparados con el C-salino. Kumari, Kaur y Bhatnagar (2011) reportaron aumento en la altura y número de hojas en plantas de tomate con la aplicación de *Sargassum jhonstonii* con dosis del 10%. Así mismo, Sariñana-Aldaco *et al.* (2021) encontraron un incremento en variables de crecimiento en plántulas de tomate al aplicar extractos hidroalcohólicos de *Sargassum* spp. Además, Khan *et al.* (2022) reportaron incrementos con la aplicación de extractos acuosos de *Sargassum wigthii* en longitud de brote, longitud de raíz y número de hojas en el cultivo de okra bajo condiciones de estrés salino (75 mM NaCl). En este sentido, la aplicación de extractos de algas marinas dirigido a la raíz promueve la

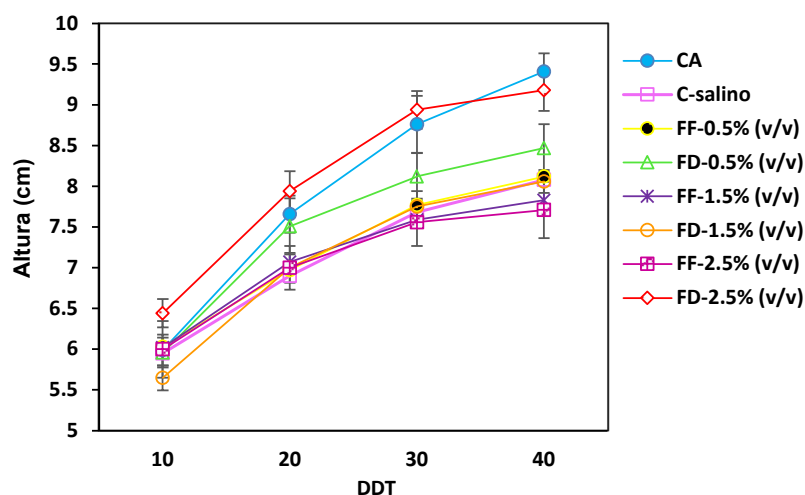


Figura 4. Altura de plántulas de chile jalapeño por efecto de la aplicación (drench y foliar) de un fermento de *Sargassum* spp.; Ff = fermento aplicado vía foliar; FD = fermento aplicado vía drench; * = indica diferencias significativas entre tratamientos; ns = no significativo (LSD, $p \leq 0.05$); las barras representan el error estándar.

Figure 4. Height of jalapeño pepper seedlings due to the application of a *Sargassum* spp. ferment under salt stress; Ff = ferment applied via foliar spray; FD = ferment applied via drench; * = indicates significant differences between treatments; ns = not significant (LSD, $p \leq 0.05$); bars represent standard error.

acumulación de polisacáridos, compuestos fenólicos y fitohormonas, lo que estimula los procesos metabólicos al inducir la síntesis de antioxidantes (Kumar *et al.*, 2024). A su vez, contribuyen al desarrollo foliar mediante una mayor capacidad de retención hídrica, mejorando la integridad y permeabilidad de las membranas celulares, y optimiza el transporte de osmolitos y iones, lo que en conjunto fortalece a las plantas ante condiciones de estrés abiótico (Dalal *et al.*, 2019).

En la Figura 5 se muestra el número de hojas en función del tiempo. El control absoluto (CA) presentó el mayor número de hojas, alcanzando un valor de 14 hojas a los 40 DDT lo que demostró un adecuado desarrollo vegetativo cuando la planta no estaba en condiciones de salinidad.

Por el contrario, el control con salinidad (C-salino) mostró el menor número de hojas con un máximo de 10 hojas a los 40 DDT, reflejando el efecto inhibitorio de la salinidad sobre la formación de órganos fotosintéticos.

Los tratamientos con la aplicación del fermento ayudaron a la formación de hojas respecto al control salino (C-salino). A los 40 DDT los tratamientos FD-2.5%, FD-1.5%, FD-0.5% obtuvieron el mayor incremento, que fue de 10, 6 y 8% respectivamente, lo que sugiere una respuesta positiva del número de hojas a los compuestos bioactivos presentes en el fermento, especialmente cuando se aplica vía drench. Por otro lado, Zou *et al.* (2019) reportaron que los extractos de *Lessonia nigrescens* promovieron el crecimiento de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) con 150 mM de NaCl. Así mismo, Hernández-Herrera *et al.*, (2022) observaron efecto positivo sobre las variables de crecimiento en plantas de tomate tratadas con extracto de algas de *Padina gymnospora* y estrés salino a 300 mM. Estos resultados pueden ser atribuidos a los compuestos presentes en las algas como los polisacáridos, compuestos fenólicos, proteínas, vitaminas y fitohormonas, modulando la expresión de genes responsables de la biosíntesis endógena de hormonas que benefician a las raíces (Ali *et al.*, 2021). Así mismo, estos compuestos podrían ser responsables de los resultados observados en las plantas sometidas a salinidad, al actuar como promotores de respuestas fisiológicas y moleculares asociadas a mecanismos de defensa, además de promover procesos relacionados con el crecimiento y desarrollo vegetal (Papoui y Koukounaras, 2025).

El diámetro del tallo (Figura 6) mostró un patrón ascendente a lo largo del tiempo en todos los tratamientos, aunque con diferencias significativas entre ellos a los 40 DDT. El control absoluto (CA) presentó el mayor engrosamiento del tallo, alcanzando 3 mm a los 40 DDT, evidenciando un desarrollo sin restricciones y buena condición fisiológica. El C-salino fue el tratamiento que presentó el menor diámetro, lo que refleja el impacto negativo del estrés salino sobre la acumulación estructural en los tallos.

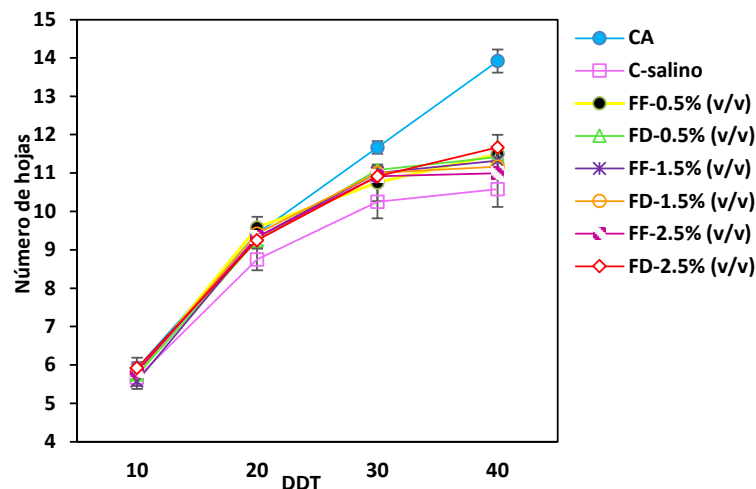


Figura 5. Número de hojas en plántulas de chile jalapeño por efecto de la aplicación de un fermento de *Sargassum* spp. sometidas a estrés salino; Ff = fermento aplicado vía foliar; FD = fermento aplicado vía drench; * = indica diferencias significativas entre tratamientos; ns = no significativo (LSD, $p \leq 0.05$); las barras representan el error estándar.

Figure 5. Number of leaves in jalapeño pepper seedlings due to the effect of applying a *Sargassum* spp. ferment under salt stress; Ff = ferment applied via foliar spray; FD = ferment applied via drench; * = indicates significant differences between treatments; ns = not significant (LSD, $p \leq 0.05$); bars represent standard error.

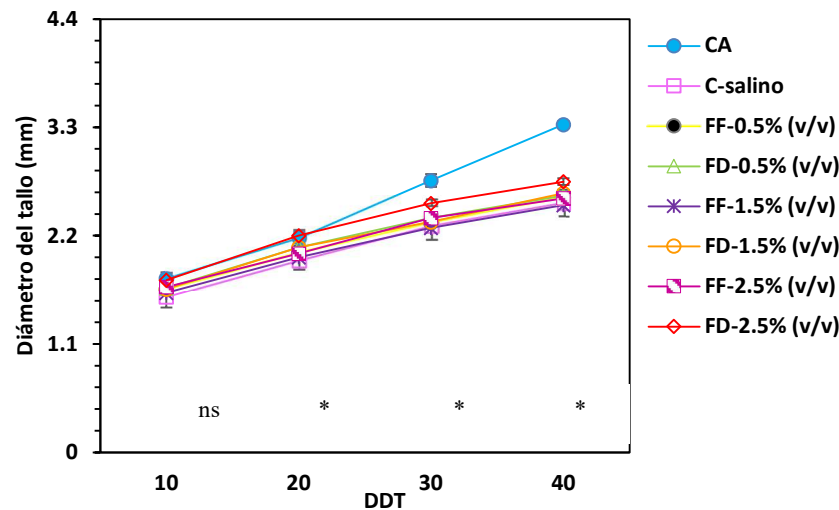


Figura 6. Diámetro del tallo en plántulas de chile jalapeño por efecto de la aplicación de un fermento de *Sargassum* spp. sometidas a estrés salino; FF = fermento aplicado vía foliar; FD = fermento aplicado vía drench; * = indica diferencias significativas entre tratamientos; ns = no significativo (LSD, $p \leq 0.05$); las barras representan el error estándar.

Figure 6. Stem diameter in jalapeño pepper seedlings due to the application of a *Sargassum* spp. ferment under salt stress; FF = ferment applied via foliar spray; FD = ferment applied via drench; * = indicates significant differences between treatments; ns = not significant (LSD, $p \leq 0.05$); bars represent standard error.

Los tratamientos con la aplicación del fermento mostraron efectos intermedios entre ambos controles. La aplicación del fermento vía drench (FD-2.5%) incrementó el diámetro del tallo en 13, 10 y 9% a los 20, 30 y 40 DDT respectivamente, comparado con el C-salino. Estos resultados coinciden con los reportados por Sariñana-Aldaco *et al.* (2022) quienes reportaron que el extracto de *Sargassum* spp. incrementó el diámetro del tallo en plántulas de tomate sometidas a estrés salino (100 mM).

Los resultados obtenidos sugieren que el fermento, contribuyó a mitigar parcialmente los efectos del estrés salino sobre el crecimiento del diámetro del tallo, posiblemente mediante la mejora de la absorción de nutrientes y la promoción del metabolismo secundario inducida por los compuestos bioactivos presentes en el fermento; sin embargo, el crecimiento no logró equiparar al observado en condiciones sin estrés, lo que indica que la salinidad continuó ejerciendo un efecto limitante, aunque parcialmente mitigado por los tratamientos (Sánchez-Bermúdez *et al.*, 2022).

Los resultados de la biomasa aérea y de raíz (Cuadro 1) indicaron que la mayor acumulación de biomasa fresca y biomasa radicular seca se obtuvo con el tratamiento FD-2.5%, con un incremento de 12 y 26% respectivamente, en comparación con el C-salino. En cuanto al control absoluto (CA) sin estrés, presentó el mayor incremento en todas las variables; mientras que, el C-salino redujo estos valores, demostrando una fuerte limitación del crecimiento. Cabe señalar que los tratamientos que fueron aplicados vía drench (FD-0.5%, FD-1.5% y FD-2.5%) presentaron los mayores incrementos en la mayoría de las variables en comparación que la vía foliar. Por otro lado, la aplicación del fermento no favoreció la longitud de raíz (LR) en todas las concentraciones evaluadas con respecto a los controles. Hamouda *et al.* (2023) reportaron que, en comparación con el control, los hallazgos demostraron que la biomasa fresca de las plántulas de chícharo disminuyó a medida que aumentaron los niveles de estrés salino a 150 mM. Esto sugiere una disminución en la capacidad fotosintética y en la absorción de agua y nutrientes (Hashem, Mansour, Khawas y Hassanein, 2019). Este efecto podría estar asociado al impacto del estrés salino sobre las funciones metabólicas de las plántulas, ya que la salinidad reduce el potencial hídrico como consecuencia del estrés osmótico y iónico. Así mismo, Hernández-Herrera *et al.* (2022) mencionaron que las plantas de tomate tratadas con extracto de algas de *Padina gymnospora* presentaron mayor peso fresco de brotes y raíces en condiciones de control y estrés salino.

Cuadro 1. Comparación de medias de vías de aplicación de fermentos a partir de *Sargassum* spp. sobre la biomasa aérea y de raíz en plántulas de chile jalapeño sometidas a estrés salino.**Table 1. Comparison of means of application methods of ferments derived from *Sargassum* spp. on shoot and root biomass in jalapeño pepper seedlings under salt stress.**

Tratamiento	BAF	BRF	BFT	BAS	BRS	BST	LR
				g ⁻¹			cm
CA	7.26 a	3.27 a	10.54 a	0.84 a	0.39 a	1.23 a	18.28 a
C-salino	3.85 cd	1.99 c	5.84 d	0.62 cd	0.23 c	0.86 cde	16.87 ab
FF-0.5%	3.90 cd	1.06 d	4.96 e	0.61 cd	0.17 d	0.79 e	16.43 bc
FD-0.5%	3.91 cd	2.70 b	6.62 bc	0.67 bc	0.26 c	0.94 bc	15.67 bcd
FF-1.5%	3.57 d	2.106 c	5.73 d	0.61 d	0.22 c	0.83 de	15.88 bcd
FD-1.5%	3.84 cd	2.71 ab	6.56 bc	0.67 bc	0.25 c	0.92 bcd	14.80 d
FF-2.5%	4.04 bc	1.94 c	5.90 cd	0.65 bcd	0.24 c	0.90 bcd	15.08 cd
FD-2.5%	4.30 b	2.86 ab	7.16 b	0.69 b	0.29 b	0.99 b	15.13 cd
C.V.	7.28	15.31	8.28	7.83	13.03	7.89	8.38
DMS	0.36	0.41	0.64	0.06	0.03	0.08	1.56

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD, $p \leq 0.05$); CA = control absoluto; BAF = biomasa aérea fresca; BRF = biomasa radicular fresca; LR = longitud de raíz; BFT = biomasa fresca total; BAS = biomasa aérea seca; BRS = biomasa radicular seca; BST = biomasa seca total; FF = fermento foliar; FD = fermento drench; C.V. = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa.

Different letters within each column indicate significant differences among treatments (LSD, $p \leq 0.05$); CA = absolute control; BAF = fresh shoot biomass; BRF = fresh root biomass; LR = root length; BFT = total fresh biomass; BAS = dry shoot biomass; BRS = dry root biomass; BST = total dry biomass; FF = foliar ferment; FD = drench ferment; C.V. = coefficient of variation; LSD = least significant difference.

Nuestros resultados podrían estar relacionados a que altas concentraciones de NaCl ocasionan estrés osmótico, dificultando la absorción de agua y nutrientes en la planta; además, de reducción en la transpiración y tasa fotosintética incrementado la degradación de clorofila lo que provoca retraso en la formación de brotes, longitud de raíz y en la biomasa (Hernández-Herrera *et al.*, 2022; Senousy *et al.*, 2023). Sin embargo, los extractos de algas cuando se aplican directamente a la raíz, pueden mejorar el crecimiento vegetal al favorecer la absorción de nutrientes calcio (Ca), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S), la actividad enzimática, el desarrollo radicular y mejorar la permeabilidad de la membrana (Shukla *et al.*, 2019). Además, estimulan la acumulación de carbohidratos no estructurales para almacenar energía y el metabolismo. Por ello, en condiciones de estrés salino los compuestos bioactivos actúan como atenuantes del daño celular promoviendo la osmorregulación y el equilibrio iónico, lo que permite a la planta mantener su funcionalidad y adaptarse ante estas condiciones de estrés osmótico (Hernández-Herrera *et al.*, 2014).

CONCLUSIONES

La aplicación del fermento líquido de *Sargassum* spp. mejoró el crecimiento en plántulas de chile jalapeño sometidas a salinidad. Estos resultados sugieren que la aplicación del fermento líquido mediante vía drench fue la más eficiente bajo las condiciones controladas de luz y temperatura del presente estudio, ya que promovió la altura de las plantas, diámetro del tallo, biomasa aérea fresca y biomasa radical seca. Esto sugiere que aplicación al sustrato favorece una llegada más directa y efectiva de los compuestos bioactivos a la zona radicular optimizando su absorción.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: S.G.M.; Metodología: V.S.P., A.R.O. y R.C.V.; Software: V.S.P.; Validación: S.G.M., A.R.O. y A.B.M.; Análisis formal: S.G.M.; Investigación: V.S.P.; Recursos: S.G.M. y A.R.O.; Curación de datos: S.G.M. y A.R.O.; Escritura – preparación del borrador original: V.S.P.; Supervisión: S.G.M., A.R.O. y R.M.R.J.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Fermentaciones y Biomoléculas del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos y al Laboratorio de Fisiología vegetal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo brindado y al SECITHI por la beca otorgada para los estudios de doctorado.

LITERATURA CITADA

- Abdul-Khalil, H. P. S., Lai, T. K., Tye, Y. Y., Rizal, S., Chong, E. W. N., Yap, S. W., ... & Paridah, M. T. (2018). A review of extractions of seaweed hydrocolloids: Properties and applications. *Express Polymer Letters*, 12(4), 296-317. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.27>
- Adebo, O. A., & Medina-Meza, I. G. (2020). Impact of fermentation on the phenolic compounds and antioxidant activity of whole cereal grains: A mini review. *Molecules*, 25(4), 1-19. <https://doi.org/10.3390/molecules25040927>
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants* 10(3), 1-27. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Blix, G., Synge, R. L. M., Eskola, S., Lång, S., Turunen, E., & Tuhkanen, A. (1948). The determination of Hexosamines According to Elson an Morgan. *Acta Chemical Scandinavica* , 2, 467-473.
- Bonilla-Loaiza, A. M., Rodríguez-Jasso, R. M., Belmares, R., López-Badillo, C. M., Araújo, R. G., Aguilar, C. N., ... & Ruiz, H. A. (2022). Fungal Proteins from *Sargassum* spp. Using Solid-State Fermentation as a Green Bioprocess Strategy. *Molecules*, 27(12), 887.
- Boutahiri, S., Benrkia, R., Tembeni, B., Idowu, O. E., & Olatunji, O. J. (2024). Effect of biostimulants on the chemical profile of food crops under normal and abiotic stress conditions. *Current Plant Biology*, 40, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100410>
- Bradford, M. M. (1976). A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical Chemistry*, 72(1-2), 248-254.
- 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>
- Carreira-Casais, A., Otero, P., Garcia-Perez, P., Garcia-Oliveira, P., Pereira, A. G., Carpena, M., ... & Prieto, M. A. (2021). Benefits and drawbacks of ultrasound-assisted extraction for the recovery of bioactive compounds from marine algae. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 1-25. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179153>
- Charles-Rodríguez, A. V., Rivera-Solís, L. L., Martins, J. T., Genisheva, Z., Robledo-Olivo, A., González-Morales, S., ... & Flores-López, M. L. (2020). Edible films based on black chia (*Salvia hispanica* L.) seed mucilage containing rhus microphylla fruit phenolic extract. *Coatings*, 10(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/coatings10040326>
- Dalal, A., Bourstein, R., Haish, N., Shenhar, I., Wallach, R., & Moshelion, M. (2019). Dynamic physiological phenotyping of drought-stressed pepper plants treated with "productivity-enhancing" and "survivability-enhancing" biostimulants. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00905>
- Devault, D. A., Pierre, R., Marfaing, H., Dolique, F., & Lopez, P. J. (2021). Sargassum contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 567-602. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>
- Días, M. C., Pinto, D. C., & Silva, A. M. (2021). Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26(17), 1-16. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L. A., Tablada, E. M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020*. software estadístico. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat.
- Hamouda, M. M., Badr, A., Ali, S. S., Adham, A. M., Ahmed, H. I. S., & Saad-Allah, K. M. (2023). Growth, physiological, and molecular responses of three phaeophyte extracts on salt-stressed pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00483-z>

- Hashem, H. A., Mansour, H. A., El-Khawas, S. A., & Hassanein, R. A. (2019). The potentiality of marine macro-algae as bio-fertilizers to improve the productivity and salt stress tolerance of canola (*Brassica napus* L.) plants. *Agronomy*, 9(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030146>
- Hernández-Herrera, R. M., Sánchez-Hernández, C. V., Palmeros-Suárez, P. A., Ocampo-Alvarez, H., Santacruz-Ruvalcaba, F., Meza-Canales, I. D., & Beceril-Espinosa, A. (2022). Seaweed extract improves growth and productivity of tomato plants under salinity stress. *Agronomy*, 12(10), 1-23. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102495>
- Hernández-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-López, M. A., Norrie, J., & Hernández-Carmona, G. (2014). Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Applied Phycology*, 26(1), 619-628. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0078-4>
- Hussen, E. M., & Endalew, S. A. (2023). In vitro antioxidant and free-radical scavenging activities of polar leaf extracts of *Vernonia amygdalina*. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 23(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12906-023-03923-y>
- Izábal-Carvajal, A. L., Sepúlveda, L., Chávez-González, M. L., Torres-León, C., Aguilar, C. N., & Ascacio-Valdés, J. A. (2023). Extraction of bioactive compounds via solid-state fermentation using *Aspergillus Niger* GH1 and *Saccharomyces cerevisiae* from pomegranate Peel. *Waste*, 1(3), 806-814. <https://doi.org/10.3390/waste1030047>
- Jin, F. J., Hu, S., Wang, B. T., & Jin, L. (2021). Advances in genetic engineering technology and its application in the industrial fungus *Aspergillus oryzae*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.644404>
- Kalaiselvan, P., Devi, N. C., Deepti, M., Devi, A. A., Akamad, K., Dheeran, P., ... & Rajesh, D. (2025). Solid-state fermentation—a sustainable future technology in aquafeeds?. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1-21. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1669719>
- Kashyap, S. P., Kumari, N., Mishra, P., Moharana, D. P., Aamir, M., Singh, B., & Prasanna, H. C. (2020). Transcriptional regulation-mediating ROS homeostasis and physio-biochemical changes in wild tomato (*Solanum chilense*) and cultivated tomato (*Solanum lycopersicum*) under high salinity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(8), 1999-2009. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.032>
- Khan, Z., Gul, H., Rauf, M., Arif, M., Hamayun, M., Ud-Din, A., ... & Lee, I. J. (2022). Sargassum wightii aqueous extract improved salt stress tolerance in *abelmoschus esculentus* by mediating metabolic and ionic rebalance. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.853272>
- Kumar, G., Nanda, S., Singh, S. K., Kumar, S., Singh, B. N., & Mukherjee, A. (2024). Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. In *Frontiers in Marine Science*, 11, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1457500>
- Kumari, R., Kaur, I., & Bhatnagar, A. K. (2011). Effect of aqueous extract of *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner on growth, yield and quality of *Lycopersicon esculentum* Mill. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 623-633. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9651-x>
- Leal-Bautista, R. M., Rodríguez-García, J. C., Acosta-González, G., Chablé-Villacis, R., Tapia-Tussell, R., Bautista-García, J. E., ... & González-López, G. (2024). Assessment of leachate generated by *sargassum* spp. In the Mexican caribe: part 1 spatial variations. *Water*, 16(9), 1-22. <https://doi.org/10.3390/w16091251>
- Li, M., Xiao, Y., Zhong, K., Wu, Y., & Gao, H. (2022). Delving into the biotransformation characteristics and mechanism of steamed green tea fermented by *aspergillus niger* pw-2 based on metabolomic and proteomic approaches. *Foods*, 11(6), 1-15. <https://doi.org/10.3390/foods11060865>
- Liang, Z., Huang, Y., Zhang, P., & Fang, Z. (2023). Impact of fermentation on the structure and antioxidant activity of selective phenolic compounds. *Food Bioscience*, 56, 103147. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103147>
- Liu, M., Yang, K., Qi, Y., Zhang, J., Fan, M., & Wei, X. (2018). Fermentation temperature and the phenolic and aroma profile of persimmon wine. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(3), 269-275. <https://doi.org/10.1002/jib.497>
- Lúquez, J., Eyherabide, G., & Petigrosso, L. R. (2023). Tolerancia a la salinidad del suelo en especies de interés agronómico. *NEXOS*, 34, 12-19.
- Mendoza-Morales, L. T., Mendoza-González, A. C., Mateo- Cid, L. E., & Rodríguez-Dorantes, A. (2019). Analysis of the effect as biostimulants of *Sargassum vulgare* and *Ulva fasciata* extracts on *Lens esculenta* growth. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(4), 15-28. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.4.15>
- Milledge, J. J., & Harvey, P. J. (2016). Golden Tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of *Sargassum* from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 1-19. <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>
- Miller. (1959). Uso del reactivo de ácido dinitrosalicílico para la determinación del azúcar reductor. *Analiytical Chemistry*, 31(3), 426-428.
- Mouga, T., Almeida, M. M., Pitacas, F. I., Rodrigues, A. M., Vitória, C., & Anjos, O. (2025). Elemental and nutritional characterisation with vibrational spectroscopy analysis of *ulva* sp., *gracilaria multipartita*, and *sargassum muticum*. *Applied Sciences*, 15(8), 1-24. <https://doi.org/10.3390/app15084212>
- Papoui, E., & Koukounaras, A. (2025). Evaluation of *ascophyllum nodosum* and *sargassum* spp. seaweed extracts' effect on germination of tomato under salinity stress. *Horticulturae*, 11(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030290>
- Paredes-Camacho, R. M., González-Morales, S., González-Fuentes, J. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *sargassum* spp. from the Mexican caribbean and its valorization through fermentation process. *Processes*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030685>
- Ramírez-Esparza, U., Ordoñez-Cano, A. J., Ochoa-Reyes, E., Méndez-González, F., Baeza-Jimenez, R., Alvarado-González, M., ... & Buenrostro-Figueroa, J. J. (2025). Development of a Bioprocess to Improve the Phenolic Compounds Content and Antioxidant Capacity in Blue Corn Grains. *Fermentation*, 11(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/fermentation11030122>
- Resiere, D., Valentino, R., Nevière, R., Banydeen, R., Gueye, P., Florentin, J., ... & Mehdaoui, H. (2018). Sargassum seaweed on Caribbean islands: an international public health concern. *The Lancet*, 392(10165), 2691. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32777-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32777-6)
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., & van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 2020(2), 1-19. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Sánchez-Bermúdez, M., del Pozo, J. C., & Pernas, M. (2022). Effects of Combined Abiotic Stresses Related to Climate Change on Root Growth in Crops *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-25. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>
- Sariñana-Aldaco, O., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A., Robledo-Olivo, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Preciado-Rangel, P., & González-Morales, S. (2021). Efecto de extractos de *Sargassum* spp. en el crecimiento y antioxidantes de plántulas de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2), 1-15. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2814>
- Sariñana-Aldaco, O., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., & González-Morales, S. (2022). The Biostimulant Effect of Hydroalcoholic Extracts of *Sargassum* spp. in Tomato Seedlings under Salt Stress. *Plants*, 11(22), 1-24. <https://doi.org/10.3390/plants11223180>
- Senousy, H. H., Hamoud, Y. A., Abu-Elsaoud, A. M., Mahmoud Al Zoubi, O., Abdelbaky, N. F., Zia-ur-Rehman, M., ... & Soliman, M. H. (2023). Algal bio-stimulants enhance salt tolerance in common bean: dissecting morphological, physiological, and genetic mechanisms for stress adaptation. *Plants*, 12(21), 1-24. <https://doi.org/10.3390/plants12213714>

- Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2019). Ascophyllum nodosum-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1.22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
- SIAP (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2021). Avances de siembras y cosechas por estado. Consultado el 22 de noviembre de 2025 desde <https://www.gob.mx/agricultura>.
- Silva, T. M., Waked, D., Bastos, A. C., Gomes, G. L., Closs, J. G. V., Tonin, F. G., ... & Veras, M. M. (2023). A custom, low-cost, continuous flow chamber built for experimental Sargassum seaweed decomposition and exposure of small rodents to generated gaseous products. *Heliyon*, 9(8), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18787>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plants and Soil*, 15, 134-154.
- Tarchoun, N., Saadaoui, W., Hamdi, K., Falleh, H., Pavli, O., Ksouri, R., & Petropoulos, S. A. (2024). Seed priming and biopriming in two squash landraces (cucurbita maxima duchesne) from tunisia: a sustainable strategy to promote germination and alleviate salt stress. *Plants*, 13(17), 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants13172464>
- Wang, T., Meng, K., Zhu, Z., Pan, L., Okita, T. W., Zhang, L., & Tian, L. (2025). The Regulatory Roles of RNA-Binding Proteins in Plant Salt Stress Response. *Plants*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/plants14091402>
- Yang, H., Zhang, X., Shi, Y., Wang, L., Chen, Y., Wu, Z., Lu, W., & Wang, X. (2025). Salinity Stress in Strawberry Seedlings Determined with a Spectral Fusion Model. *Agronomy*, 15(6), 1-23. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061275>
- Zamljen, T., Medic, A., Hudina, M., Veberic, R., & Slatnar, A. (2022). Salt stress differentially affects the primary and secondary metabolism of peppers (capsicum annuum l.) According to the genotype, fruit part, and salinity level. *Plants*, 11(7), 1-18. <https://doi.org/10.3390/plants11070853>
- Zheng, J., Yu, L., Aaqil, M., Wang, Q., Peng, W., Zhuang, L., ... & Yang, R. (2024). Enhanced fermentation of pu-erh tea with aspergillus niger: quality and microbial community analysis. *Molecules*, 29(23), 1-18. <https://doi.org/10.3390/molecules29235647>
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555-559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)
- Zou, P., Lu, X., Zhao, H., Yuan, Y., Meng, L., Zhang, C., & Li, Y. (2019). Polysaccharides derived from the brown algae Lessonia nigrescens enhance salt stress tolerance to wheat seedlings by enhancing the antioxidant system and modulating intracellular ion concentration. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00048>