

## APLICACIÓN BIOTECNOLÓGICA DEL EXTRACTO DEL ALGA *PADINA PAVONICA* EN EL CRECIMIENTO DE *LENS CULINARIS* Y *VIGNA UNGUICULATA* BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

## BIOTECHNOLOGICAL APPLICATION OF *PADINA PAVONICA* ALGAL EXTRACT ON THE GROWTH OF *LENS CULINARIS* AND *VIGNA UNGUICULATA* UNDER CONTROLLED CONDITIONS

Jamileth Mendoza Barros<sup>1</sup>, Evelyn Cedeño Pilozo<sup>1</sup>,  
Eduardo Xavier Pico Lozano<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Carrera Biología, Facultad Ciencias de la Vida y Tecnología Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí

\* Autor correspondencia: [eduardo.pico@uleam.edu.ec](mailto:eduardo.pico@uleam.edu.ec)

### Resumen

Este estudio evaluó el potencial biotecnológico del extracto de *Padina pavonica* como biofertilizante alternativo sostenible en leguminosas de importancia agrícola. Se implementó un diseño experimental completamente aleatorizado factorial 2×3, evaluando *Lens culinaris* (lenteja) y *Vigna unguiculata* (frijol) bajo tres tratamientos: control (0 g/L), T1 (13.3 g/L) y T2 (26.6 g/L) durante 8 semanas con 60 plantas totales. El alga fue recolectada en Barbasquillo, Manta, Ecuador, y el ensayo se desarrolló en Montecristi. El análisis químico del extracto reveló concentraciones de macronutrientes (N: 2.8, P: 0.09, K: 1.04 ppm) y micronutrientes esenciales (Fe: 867, Mn: 307, Zn: 47 ppm). Los resultados mostraron incrementos significativos de crecimiento en ambas especies: en lentejas, T1 aumentó 35% (8.67 cm vs 6.42 cm control) y T2 incrementó 82% (11.70 cm), mientras que en frijoles, T1 mejoró 60% (8.09 cm vs 5.06 cm control) y T2 aumentó 135% (11.91 cm). El análisis estadístico Kruskal-Wallis confirmó diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ), y las comparaciones post-hoc de Dunn indicaron que ambas concentraciones difieren significativamente del control ( $p < 0.01$ ), pero no entre sí ( $p > 0.05$ ), sugiriendo 13.3 g/L como dosis mínima efectiva. Los datos demuestran la eficacia del extracto como bioestimulante natural con potencial comercial para agricultura sostenible.

**Palabras clave:** Biotecnología, *Padina pavonica*, Fertilizante, Leguminosas

### Abstract

This study evaluated the biotechnological potential of *Padina pavonica* extract as a sustainable alternative biofertilizer for agriculturally important legumes. A completely randomized 2×3 factorial experimental design was implemented, assessing *Lens culinaris* (lentil) and *Vigna unguiculata* (cowpea) under three treatments: control (0 g/L), T1 (13.3 g/L), and T2 (26.6 g/L) over 8 weeks with a total of 60 plants. The algae were collected in Barbasquillo, Manta, Ecuador, and the experiment was conducted in Montecristi. Chemical analysis of the extract revealed macronutrient concentrations (N: 2.8, P: 0.09, K: 1.04 ppm) and essential micronutrients (Fe: 867, Mn: 307, Zn: 47 ppm). The results showed significant growth increases in both species: in lentils, T1 increased growth by 35% (8.67 cm vs. 6.42 cm control) and T2 by 82% (11.70 cm), while in cowpeas, T1 improved growth by 60% (8.09 cm vs. 5.06 cm control) and T2 by 135% (11.91 cm). Kruskal-Wallis statistical analysis confirmed significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ), and Dunn's post-hoc comparisons indicated that both concentrations differed significantly from the control ( $p < 0.01$ ), but not from each other ( $p > 0.05$ ), suggesting 13.3 g/L as the minimum effective dose. The data demonstrate the efficacy of the extract as a natural biostimulant with commercial potential for sustainable agriculture.

**Keywords:** Biotechnology, *Padina pavonica*, Fertilizer, Legumes

Recibido: 2025-03-19 Aceptado: 2025-05-26 Publicado: 2025-06-28

## 1. Introducción

La agricultura moderna se encuentra en una encrucijada crítica. Por un lado, debe mantener o incrementar la productividad para satisfacer las demandas de una población global en crecimiento; por otro, enfrenta el imperativo urgente de volverse más sostenible y resiliente ante los efectos del cambio climático, la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad. En este contexto, uno de los desafíos más relevantes es la continua dependencia de insumos sintéticos, particularmente los fertilizantes químicos, cuya aplicación intensiva ha demostrado no solo ser ambientalmente insostenible, sino además ineficaz para mejorar los rendimientos de forma constante en diversos cultivos (Reinoso-Collahuazo & Abad-Araujo, 2019).

Los fertilizantes inorgánicos, si bien han sido clave en la Revolución Verde, generan múltiples externalidades negativas. Desde el punto de vista de la salud humana, se ha reportado que el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados puede conducir a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas y productos agrícolas, lo que se ha asociado con enfermedades como la metahemoglobinemia y varios tipos de cáncer gastrointestinal (Bhardwaj et al., 2014). A nivel ambiental, su impacto es igualmente alarmante: contribuyen a la eutrofización de ecosistemas acuáticos, la acidificación de suelos, el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero y la pérdida de microorganismos beneficiosos en el suelo (Bhardwaj et al., 2014).

En consecuencia, la estructura y funcionalidad de los agroecosistemas se ven comprometidas. El deterioro de la calidad del suelo, la disminución de la biodiversidad microbiana y la reducción de la materia orgánica son algunos de los efectos adversos más comunes (Ammar et al., 2022). Ante este panorama, la comunidad científica ha intensificado la búsqueda de alternativas que permitan conciliar la productividad con la sostenibilidad. En este sentido, Tilman et al. (2002) proponen un cambio de paradigma hacia

sistemas agrícolas más sostenibles, basados en el manejo ecológico de los recursos, la reducción de insumos externos y el aprovechamiento de procesos biológicos naturales.

Dentro de este enfoque emergen los biofertilizantes, productos biológicos elaborados a partir de microorganismos beneficiosos—como bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos micorrízicos o cianobacterias—que interactúan de manera simbiótica o sinérgica con las plantas, promoviendo su desarrollo sin los efectos colaterales de los insumos sintéticos (Bhardwaj et al., 2014). Según Jiménez-Tobón (2023), estos bioinsumos se obtienen a partir de matrices ambientales como suelos, compostas o recursos acuáticos, y actúan mediante mecanismos como la solubilización de nutrientes, la producción de fitohormonas, la mejora de la estructura edáfica y el control biológico de patógenos. Todo ello contribuye a fortalecer la salud del agroecosistema y mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes.

Adicionalmente, los biofertilizantes presentan características que los convierten en agentes de alto valor agregado: su capacidad de persistencia en el suelo, su bajo impacto ambiental y su potencial para aumentar la resistencia de las plantas frente a condiciones adversas como sequía, salinidad o estrés térmico (Malusá & Vassilev, 2014). Esta funcionalidad los posiciona como herramientas clave dentro de la agricultura orgánica, que promueve sistemas más integrados, basados en el uso de recursos renovables y en la minimización del impacto ambiental.

Entre los insumos alternativos, las algas marinas se destacan por su alto contenido de compuestos bioactivos, como polisacáridos, aminoácidos, antioxidantes y fitohormonas, que actúan como bioestimulantes naturales. Estos extractos no solo nutren, sino que también activan mecanismos fisiológicos de defensa en las plantas, estimulan la germinación, la elongación celular y el crecimiento radicular, al tiempo que mejoran la absorción de agua y nutrientes (Khan et al., 2009).

El uso de algas en agricultura no es reciente, pero en las últimas décadas ha cobrado mayor relevancia científica debido a su eficacia y sostenibilidad.

Diversas investigaciones han documentado los efectos positivos de extractos algales en el desarrollo vegetal. Por ejemplo, el uso de extractos de *Sargassum vulgare* ha demostrado mejoras notables en el crecimiento del cilantro, así como en la calidad del suelo al aportar nutrientes esenciales (Uribe-Orozco et al., 2028). De igual manera, estudios realizados con extractos de macroalgas en girasol evidencian una mejora significativa en la calidad y biomasa de las plantas tratadas (Chbani et al., 2013). Estas observaciones sugieren que los extractos algales no solo cumplen una función nutritiva, sino que también pueden influir en el metabolismo vegetal de forma positiva y multifuncional.

Entre las especies de algas con mayor potencial agrícola se encuentra *Padina pavonica*, un alga parda rica en compuestos fenólicos, esteroides y minerales. Investigaciones preliminares indican que los extractos de *P. pavonica* pueden mejorar la absorción de nutrientes, estimular la producción de biomasa y aumentar la tolerancia de las plantas a condiciones de estrés abiótico como salinidad o sequía (Chbani et al., 2013). Además, estos extractos presentan una acción sinérgica al actuar como bioestimulantes y reguladores del crecimiento, lo que los convierte en una alternativa viable para reducir el uso de fertilizantes convencionales (El Boukhari et al., 2020).

En este contexto, la presente investigación evalúa el efecto de dos concentraciones de extracto de *P. pavonica* sobre el crecimiento de dos especies de interés agrícola: *Lens culinaris* (lenteja) y *Vigna unguiculata* (frijol). Estos cultivos representan una fuente importante de proteínas vegetales y poseen relevancia en sistemas de producción sustentable, tanto por su adaptabilidad como por su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico.

El objetivo principal fue determinar si la aplicación de extractos de *P. pavonica* bajo condiciones controladas puede mejorar el crecimiento y desarrollo de estas leguminosas, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías biotecnológicas sostenibles para la agricultura. Los resultados permitirán avanzar en la formulación de bioinsumos alternativos, basados en recursos marinos, que reduzcan la dependencia de agroquímicos y promuevan la salud integral de los agroecosistemas.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Muestreo

La recolección del alga *P. pavonica* se llevó a cabo en la playa Barbasquillo, localizada al sur de la ciudad de Manta, en la provincia de Manabí, Ecuador. El sitio de recolección se encuentra en la zona intermareal, con coordenadas geográficas de latitud 0° 56' 38" S (-0.94391°) y longitud 80° 44' 55" O (-80.74864°). Esta zona es caracterizada por formaciones rocosas expuestas durante la marea baja, lo que facilita la recolección manual del alga en condiciones óptimas.

Durante el monitoreo realizado entre junio y julio de 2024, las condiciones ambientales en la zona de estudio incluyeron una temperatura promedio de 25.8°C, una humedad del 80.4%, una velocidad del viento de 0.49 m/s, 0.05 mm de lluvia, un índice UV de 0.91 y una radiación solar de 149.5 W/m<sup>2</sup>.

El ensayo experimental se realizó en la parroquia Montecristi, ciudad de Montecristi, provincia de Manabí, Ecuador. El área destinada a los tratamientos contó con una superficie total de 80 m<sup>2</sup> (10 m × 8 m), ubicada en las coordenadas geográficas: latitud 1° 03' 25.3" S (-1.057104°) y longitud 80° 38' 58.0" O (-80.649457°).

La recolección del alga se realizó entre los meses de agosto y septiembre, con una frecuencia semanal (cada siete días) durante un período de cinco semanas consecutivas. En cada visita se recolectaron manualmente aproximadamente 3 kg de biomasa fresca, obtenida directamente de las

rocas durante la marea baja. Posteriormente, el alga fue lavada cuidadosamente con agua de mar para remover impurezas visibles, microorganismos y restos de materia rocosa adherida.

Una vez limpia, la biomasa fue sometida a un proceso de deshidratación por exposición solar durante 72 horas. Tras el secado completo, el material fue triturado durante seis minutos en licuadora doméstica, hasta obtener un polvo fino. Este polvo se almacenó en fundas herméticas con dosificaciones de 2 g y 4 g, según los tratamientos establecidos, y se conservó en condiciones secas hasta su aplicación.

Para la preparación del extracto, cada dosis fue disuelta en 150 mL de agua potable, asegurando una correcta homogenización mediante agitación manual. Esta dilución estandarizada permitió aplicar el biofertilizante de forma uniforme a todas las plantas tratadas.

Se emplearon dos especies de leguminosas de interés agrícola: lenteja (*Lens culinaris*) y frijol (*Vigna unguiculata*). Las semillas utilizadas fueron certificadas y provistas por la empresa Agripac. Para garantizar una germinación uniforme y saludable, se realizaron tratamientos de pregerminación bajo condiciones controladas.

A partir de la tercera semana se logró una supervivencia del 100 %, momento en el cual se procedió con la aplicación de los tratamientos con extracto de *P. pavonica*.

Previo a la siembra, el terreno experimental fue preparado mediante arado a una profundidad de 20 cm. Posteriormente, se incorporó materia orgánica compuesta por restos vegetales secos, cáscaras de frutas y residuos de vegetales, con el objetivo de mejorar las propiedades físico-químicas del suelo, como la aireación, la capacidad de retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes. Este proceso de acondicionamiento se efectuó un mes antes de la siembra.

## 2.2 Análisis de datos

Se empleó un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial  $2 \times 3$ . Los factores evaluados fueron:

**Factor A:** Tipo de cultivo (2 niveles)

A1: *Lens culinaris*

A2: *Vigna unguiculata*

**Factor B:** Dosis de biofertilizante (3 niveles)

B0: Control (sin biofertilizante)

B1: 2 g disueltos en 150 mL de agua (13,3 g/L)

B2: 4 g disueltos en 150 mL de agua (26,6 g/L)

Cada tratamiento fue replicado en 10 unidades experimentales (plantas), totalizando 60 plantas: 2 especies  $\times$  3 tratamientos  $\times$  10 réplicas.

- Duración del experimento: 8 semanas
- Frecuencia de riego: Diaria (1 vez por día)
- Sustrato utilizado: Mezcla de materia orgánica

### Tratamientos aplicados:

Para *L. culinaris*

LTC: Control

LT1: 13.3 g/L de biofertilizante

LT2: 26.6 g/L de biofertilizante

Para *V. unguiculata*

FTC: Control

FT1: 13.3 g/L de biofertilizante

FT2: 26.6 g/L de biofertilizante

Se evaluó una variable morfológica principal: altura de planta (cm). Las mediciones se realizaron semanalmente, iniciando desde la tercera semana del experimento.

Las mediciones de altura de las plantas se realizaron mediante el software ImageJ, el cual permite obtener valores precisos a partir de fotografías digitales. Para cada planta, se registraron imágenes individuales junto con una escala de referencia. Las mediciones se efectuaron desde la base del tallo hasta el ápice de la planta.

Los datos obtenidos fueron organizados y analizados con el software estadístico JASP,

donde se realizaron comparaciones entre tratamientos para identificar diferencias significativas. Los resultados se representaron gráficamente para facilitar la interpretación de los efectos del biofertilizante sobre el crecimiento vegetal.

Para evaluar el efecto del extracto de *P. pavonica* sobre el crecimiento de *L. culinaris* y *V. unguiculata*, se recolectaron 180 datos por cada especie vegetal a lo largo de ocho semanas. Previamente al análisis de los tratamientos, se verificó que los valores iniciales de las plantas no presentaran diferencias significativas entre sí, lo que permitía asumir condiciones homogéneas de partida.

Para determinar si los datos cumplían con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas requeridos para aplicar un ANOVA, se

realizaron pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Levene, respectivamente. Dado que el número de muestras era superior a 50, se utilizó Kolmogorov-Smirnov como test de normalidad, arrojando valores de  $p = 0.204$  para lenteja y  $p = 0.314$  para frijol, indicando que los datos seguían una distribución normal.

Sin embargo, la prueba de Levene mostró que no se cumplía la homogeneidad de varianzas (lenteja:  $p = 0.048$ ; frijol:  $p < 0.001$ ), por lo que se optó por aplicar pruebas no paramétricas. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tratamientos, y posteriormente se aplicaron comparaciones múltiples mediante el test de Dunn como prueba post-hoc, con ajuste para comparaciones múltiples. Los análisis se realizaron con un nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ).

### 3. Resultados

Los componentes químicos del extracto sólido de algas *P. pavonica* se analizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones

Agropecuarias (INIAP), cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Componentes químicos del extracto sólido de alga *P. pavonica* (ppm)

Nº de laboratorio	Muestra	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Fe	Mn
85719	Algas	2.8	0.09	1.04	6.23	1.11	0.31	20	47	26	867	307

**Fuente:** Laboratorio INIAP.

#### Lenteja (*L. culinaris*) – LT

La prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados en el cultivo de lenteja ( $p < 0.05$ ) (Tabla 2). Esto indica que el tiempo y los tratamientos influyen significativamente en las variables de crecimiento analizadas.

Posteriormente, las comparaciones post-hoc mediante la prueba de Dunn indicaron diferencias

significativas entre el tratamiento Control (TC) con Tratamiento 1 (T1) ( $p = 0.005$ ) y Tratamiento 2 (T2) ( $p = 0.003$ ), mientras que entre T1 y T2 no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.855$ ) (Tabla 3).

En el análisis temporal (Tabla 4), todas las semanas mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), excepto en las comparaciones S3-S4 ( $p = 0.087$ ), S6-S7 ( $p = 0.078$ ) y S7-S8 ( $p = 0.194$ ), que no presentaron diferencias significativas.

**Tabla 2.** Resultados de Kruskal-Wallis para *L. culinaris*.

Kruskal-Wallis Test			
Factor	Statistic	df	p
Tratamiento	11.236	2	0.004
Tiempo	145.278	5	< .001

**Tabla 3.** Comparaciones de Dunn – Tratamientos (*L. culinaris*)

*Dunn's Post Hoc Comparisons - Tratamiento*

Comparison	z	W <sub>i</sub>	W <sub>j</sub>	r <sub>rb</sub>	P	P <sub>bonf</sub>	P <sub>holm</sub>
LT1 - LT2	-0.182	98.825	100.558	0.042	0.855	1.000	0.855
LT1 - LTC	2.808	98.825	72.117	0.320	0.005	0.015	0.010
LT2 - LTC	2.990	100.558	72.117	0.293	0.003	0.008	0.008

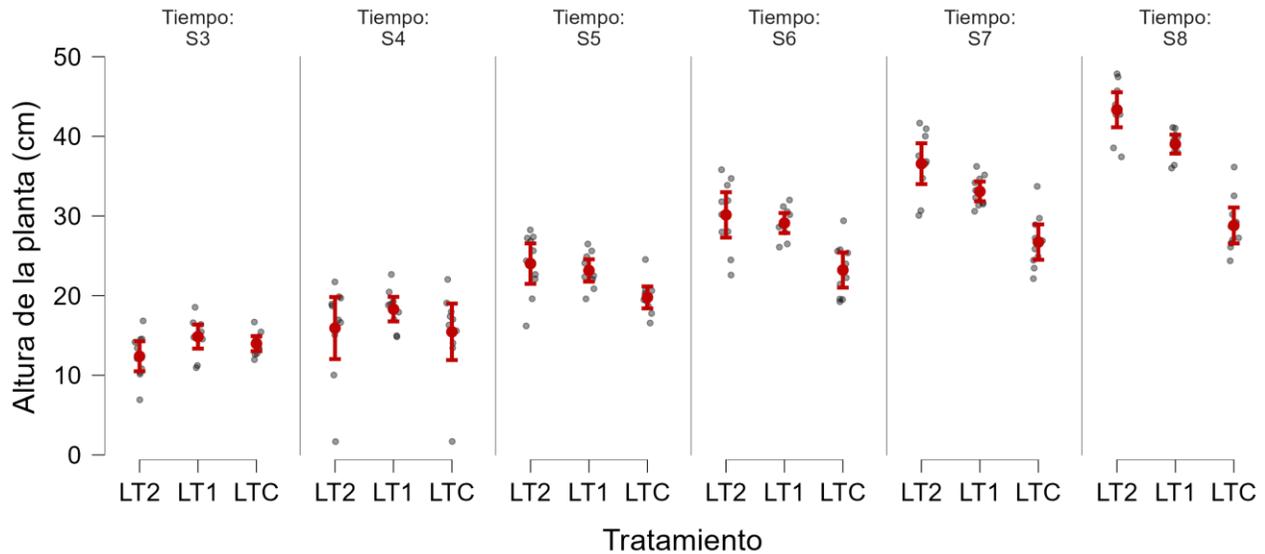
**Tabla 4.** Comparaciones de Dunn – Tiempo (*L. culinaris*)

*Dunn's Post Hoc Comparisons - Tiempo*

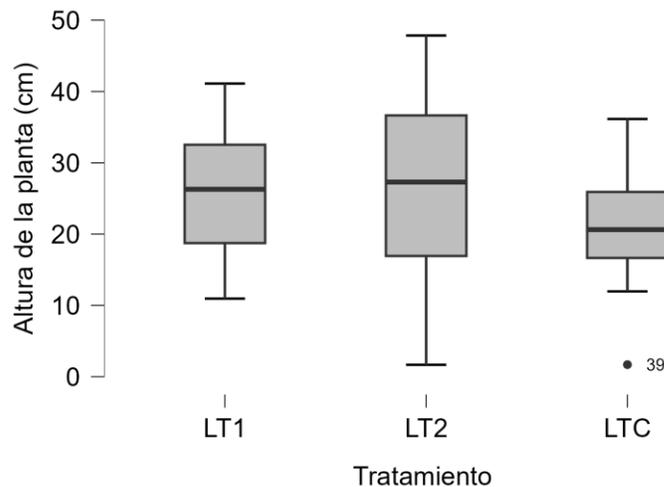
Comparison	z	W <sub>i</sub>	W <sub>j</sub>	r <sub>rb</sub>	p	P <sub>bonf</sub>	P <sub>holm</sub>
S3 - S4	-1.712	21.450	44.483	0.626	0.087	1.000	0.233
S3 - S5	-4.324	21.450	79.617	0.978	< .001	< .001	< .001
S3 - S6	-6.644	21.450	110.833	1.000	< .001	< .001	< .001
S3 - S7	-8.408	21.450	134.567	1.000	< .001	< .001	< .001
S3 - S8	-9.707	21.450	152.050	1.000	< .001	< .001	< .001
S4 - S5	-2.611	44.483	79.617	0.749	0.009	0.135	0.045
S4 - S6	-4.932	44.483	110.833	0.947	< .001	< .001	< .001
S4 - S7	-6.696	44.483	134.567	0.998	< .001	< .001	< .001
S4 - S8	-7.995	44.483	152.050	1.000	< .001	< .001	< .001
S5 - S6	-2.320	79.617	110.833	0.622	0.020	0.305	0.081
S5 - S7	-4.084	79.617	134.567	0.882	< .001	< .001	< .001
S5 - S8	-5.384	79.617	152.050	0.948	< .001	< .001	< .001
S6 - S7	-1.764	110.833	134.567	0.496	0.078	1.000	0.233
S6 - S8	-3.064	110.833	152.050	0.718	0.002	0.033	0.013
S7 - S8	-1.300	134.567	152.050	0.438	0.194	1.000	0.233

La Figura 1 muestra la evolución de la altura de las plantas de lenteja desde la semana 3 hasta la semana 8 bajo los tres tratamientos. Se observa una tendencia ascendente en todos los casos. El crecimiento promedio fue menor en TC (6.42 cm), intermedio en T1 (8.67 cm) y mayor en T2 (11.70 cm).

El diagrama de cajas (Figura 2) ilustra la distribución de los datos por tratamiento. TC presentó una mediana más baja (~20 cm) con un valor atípico <5 cm. T1 tuvo una mediana de ~30 cm y T2 una mediana ~35 cm, mostrando mayor efectividad en el crecimiento vegetal.



**Figura 1.** Variación de la altura de lentejas (cm) a lo largo del tiempo.



**Figura 2.** Diagrama de caja – *Lens culinaris*.

**Frijol (*V. unguiculata*) – FT**

De manera similar, la prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados en el cultivo de frijol ( $p < 0.05$ ) (Tabla 5). La prueba

de Dunn mostró que el Control difiere significativamente de T1 y T2 ( $p < 0.05$ ), pero no hubo diferencias significativas entre T1 y T2 ( $p = 0.280$ ) (Tabla 6). En cuanto a la comparación por semanas, la mayoría presentaron diferencias significativas, con excepción de algunas con  $p > 0.05$  (Tabla 7).

**Tabla 5.** Resultados de Kruskal-Wallis para *V. unguiculata*.

*Kruskal-Wallis Test*

Factor	Statistic	df	P
Tratamiento 2	22.833	2	< .001
Tiempo 2	138.875	5	< .001

**Tabla 6.** Comparaciones de Dunn – Tratamientos (*V. unguiculata*)

*Dunn's Post Hoc Comparisons - Tratamiento 2*

Comparison	z	W <sub>i</sub>	W <sub>j</sub>	r <sub>rb</sub>	P	p <sub>bonf</sub>	p <sub>holm</sub>
FT1 - FT2	-1.079	98.150	108.417	0.146	0.280	0.841	0.280
FT1 - FTC	3.492	98.150	64.933	0.401	< .001	0.001	< .001
FT2 - FTC	4.571	108.417	64.933	0.451	< .001	< .001	< .001

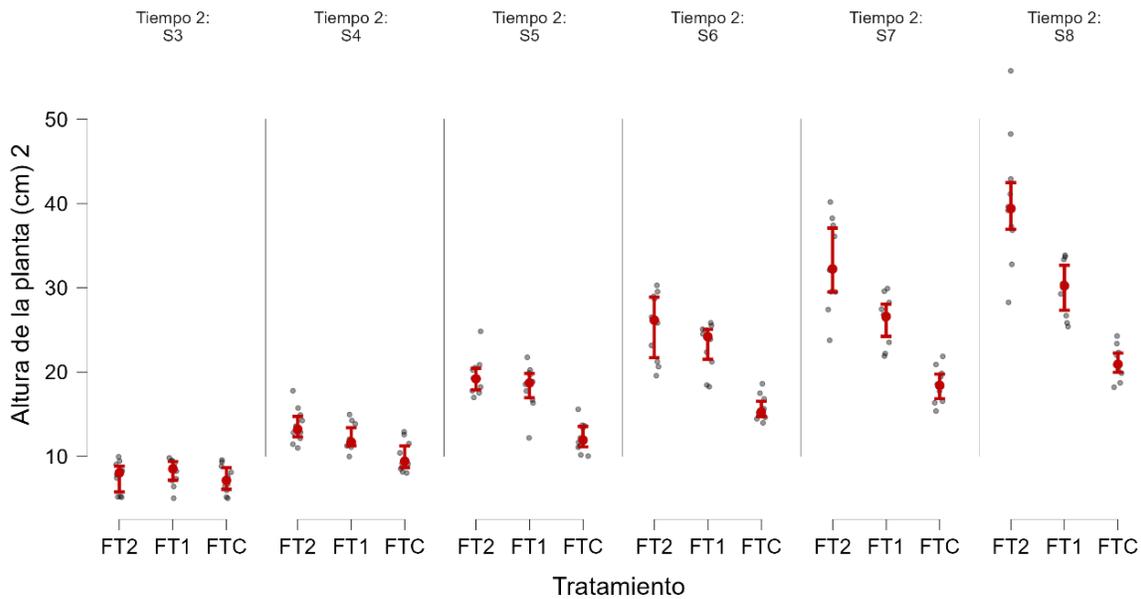
**Tabla 7.** Comparaciones de Dunn – Tiempo (*V. unguiculata*)

*Dunn's Post Hoc Comparisons - Tiempo 2*

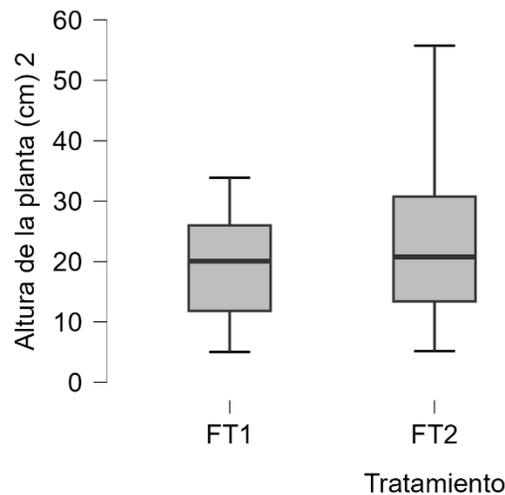
Comparison	z	W <sub>i</sub>	W <sub>j</sub>	r <sub>rb</sub>	P	p <sub>bonf</sub>	p <sub>holm</sub>
S3 - S4	-2.401	17.417	49.717	0.872	0.016	0.245	0.065
S3 - S5	-4.890	17.417	83.200	1.000	< .001	< .001	< .001
S3 - S6	-7.069	17.417	112.517	1.000	< .001	< .001	< .001
S3 - S7	-8.565	17.417	132.650	1.000	< .001	< .001	< .001
S3 - S8	-9.669	17.417	147.500	1.000	< .001	< .001	< .001
S4 - S5	-2.489	49.717	83.200	0.656	0.013	0.192	0.064
S4 - S6	-4.668	49.717	112.517	0.947	< .001	< .001	< .001
S4 - S7	-6.164	49.717	132.650	0.989	< .001	< .001	< .001
S4 - S8	-7.268	49.717	147.500	1.000	< .001	< .001	< .001
S5 - S6	-2.179	83.200	112.517	0.498	0.029	0.440	0.088
S5 - S7	-3.676	83.200	132.650	0.740	< .001	0.004	0.002
S5 - S8	-4.779	83.200	147.500	0.904	< .001	< .001	< .001
S6 - S7	-1.497	112.517	132.650	0.379	0.135	1.000	0.269
S6 - S8	-2.600	112.517	147.500	0.598	0.009	0.140	0.056
S7 - S8	-1.104	132.650	147.500	0.298	0.270	1.000	0.270

La Figura 3 muestra la evolución del crecimiento en altura del frijol desde la semana 3 hasta la semana 8, observándose nuevamente una tendencia ascendente. El crecimiento promedio fue menor en TC (5.06 cm), intermedio en T1 (8.09 cm) y mayor en T2 (11.91 cm). El diagrama

de cajas (Figura 4) indica que TC presentó la mediana más baja (~15 cm) y menor dispersión. T1 mostró mayor variabilidad (~20 cm de mediana), y T2 fue el tratamiento más efectivo con una mediana de ~30 cm.



**Figura 3.** Variación de la altura del frijol (cm) a lo largo del tiempo.



**Figura 4.** Diagrama de caja – *V. unguiculata*

#### 4. Discusión

Las macroalgas representan una de las alternativas más prometedoras en el desarrollo de biofertilizantes sostenibles para la agricultura del siglo XXI. En el contexto actual de cambio climático y degradación ambiental, el mercado global de biofertilizantes crecerá a una tasa anual de 11,4% entre 2024 y 2032, impulsado por la tendencia mundial de promover la agricultura sostenible. Las algas marinas, particularmente especies del género *Padina*, constituyen una fuente rica en compuestos bioactivos incluyendo fitohormonas, aminoácidos esenciales, polisacáridos complejos, y una amplia gama de macro y micronutrientes que pueden revolucionar la forma en que abordamos la nutrición vegetal. *P. pavonica*, como objeto de esta investigación, presenta características únicas que la posicionan como un candidato excepcional para el desarrollo de biofertilizantes de nueva generación, ofreciendo no solo beneficios nutricionales directos sino también propiedades bioestimulantes que pueden fortalecer la resistencia de las plantas ante factores de estrés bióticos y abióticos.

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman de manera contundente que el biofertilizante basado en *P. pavonica* incrementa significativamente el crecimiento de *L. culinaris* y *V. unguiculata*, validando el objetivo principal del estudio. El análisis químico del extracto acuoso de esta alga mostró la presencia de macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) necesarios para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Este hallazgo es consistente con los reportes de Bhardwaj et al. (2014), quienes documentaron que los extractos algales estimulan el crecimiento vegetal mediante la liberación de hormonas vegetales endógenas y la optimización de la absorción de nutrientes a nivel radicular.

La efectividad observada en ambas especies de leguminosas sugiere que *P. pavonica* posee un perfil de bioactividad amplio que trasciende las diferencias interespecíficas. Estudios previos han

demostrado que la germinación total (100%) de semillas se observó con el tratamiento de extracto líquido de algas al 20% de concentración, representando un incremento del 11% sobre el control. Esta respuesta consistente indica la presencia de compuestos promotores del crecimiento universalmente reconocidos por diferentes especies vegetales, lo cual es fundamental para su potencial aplicación comercial diversificada.

La investigación realizada refuerza significativamente los hallazgos de Collahuazo-Reinoso y Araujo-Abad (2019), quienes posicionan a los biofertilizantes basados en macroalgas como alternativas sostenibles frente a los fertilizantes químicos convencionales. Los estudios de Nabti et al. (2016) y Soto-Jiménez (2019) han demostrado que estos biofertilizantes no solo contribuyen al crecimiento vegetal, sino que también mejoran la estructura del suelo, incrementan la actividad microbiana beneficiosa y reducen significativamente la dependencia de agroquímicos sintéticos.

Los biofertilizantes y/o bioestimulantes procedentes de las microalgas suponen una alternativa natural y sostenible para la producción agrícola, ya que numerosas especies contienen cantidades relevantes de fitohormonas. Esta característica posiciona a *P. pavonica* como un componente clave en sistemas de agricultura regenerativa, donde la salud del suelo y la biodiversidad microbiana son fundamentales para la productividad a largo plazo.

La metodología empleada en este estudio se alinea perfectamente con las tendencias actuales en biotecnología agrícola. Espinosa-Antón et al. (2021) reportaron que las macroalgas pardas son ampliamente utilizadas como biofertilizantes, bioestimulantes y mejoradores de suelo en cultivos diversos, incluyendo hortalizas, leguminosas, cereales y plantas ornamentales. Las macroalgas tienen una gran habilidad para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, y se utilizan como biofertilizantes lo que

permite aumentar el rendimiento de varios cultivos.

Esta versatilidad de aplicación, combinada con los resultados positivos obtenidos en condiciones controladas, sugiere que *P. pavonica* puede ser desarrollada como un biofertilizante comercialmente viable. Craigie et al. (2011) y Pérez-Madruga et al. (2020) han documentado el éxito comercial de productos similares en mercados internacionales, validando la viabilidad económica de esta tecnología.

Los resultados del estudio son consistentes con los hallazgos de Pacheco Flores-de-Valgaz et al. (2024), quienes documentaron que dosis relativamente bajas de extractos de macroalgas en cultivos ecuatorianos promovieron un crecimiento sostenible y económicamente viable. Estudios recientes han demostrado que la concentración óptima del extracto de *P. pavonica* puede mitigar efectivamente las condiciones de estrés por sequía, lo cual amplía significativamente su potencial de aplicación en regiones áridas y semiáridas.

Sin embargo, como señalan Panda et al. (2022), la efectividad de los biofertilizantes depende críticamente de factores como la concentración, frecuencia de aplicación, método de extracción y condiciones de almacenamiento. Zhang et al. (2023) añaden que la estandarización de procesos de producción es esencial para garantizar la consistencia y reproducibilidad de los efectos bioestimulantes.

Proyectos recientes liderados por científicas argentinas demuestran que los biofertilizantes podrían revolucionar la producción agrícola, prometiendo reemplazar químicos y cuidar el medio ambiente. Esta tendencia global hacia biotecnologías agrícolas sostenibles representa una oportunidad significativa para el desarrollo comercial de productos basados en *P. pavonica*. La creciente demanda de alimentos orgánicos y productos agrícolas sostenibles, combinada con regulaciones ambientales cada vez más estrictas,

posiciona favorablemente a los biofertilizantes algales en el mercado global. Kumar et al. (2024) proyectan que el sector de biofertilizantes marinos experimentará un crecimiento exponencial en la próxima década, especialmente en regiones con alta biodiversidad algal como el Mediterráneo y las costas tropicales.

Limitaciones del estudio y direcciones futuras de investigación

El presente estudio, aunque metodológicamente sólido, presenta varias limitaciones que deben ser abordadas para una comprensión más completa del potencial de *P. pavonica* como biofertilizante.

La principal limitación radica en que la investigación se realizó exclusivamente en condiciones controladas de laboratorio, lo que restringe significativamente la extrapolación directa a condiciones de campo donde múltiples factores ambientales interactúan de manera compleja. Variables como fluctuaciones climáticas, variabilidad del suelo, presencia de patógenos, competencia con malezas y interacciones con comunidades microbianas nativas pueden influir dramáticamente en la efectividad del biofertilizante.

Adicionalmente, el estudio se limitó a dos especies de leguminosas, lo cual, aunque proporciona una base sólida, no permite generalizar los resultados a otras familias taxonómicas de importancia agrícola. La duración relativamente corta del experimento también constituye una limitación, ya que los efectos a largo plazo sobre la salud del suelo, la acumulación de nutrientes y la sostenibilidad del sistema productivo no pudieron ser evaluados.

## 5. Conclusiones

Los resultados experimentales confirman que el extracto de *P. pavonica* constituye un biofertilizante efectivo que incrementa significativamente el crecimiento de leguminosas, con mejoras de 35-82% en lentejas y 60-135% en frijoles comparado con el control, validando su

potencial como alternativa sostenible a fertilizantes sintéticos. La concentración óptima de 13.3 g/L representa la dosis mínima efectiva, ofreciendo ventajas económicas para su implementación comercial, mientras que la composición nutricional rica en micronutrientes esenciales (Fe: 867 ppm, Mn: 307 ppm) explica parcialmente su mecanismo bioestimulante. La consistencia de respuesta en ambas especies leguminosas sugiere un amplio espectro de aplicación, posicionando este recurso marino como una herramienta biotecnológica prometedora para el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes, contribuyendo a la reducción de dependencia de agroquímicos sintéticos y promoviendo la salud integral de los agroecosistemas en el contexto actual de agricultura regenerativa.

## 6. Declaración de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## 7. Referencias

Alasvandyari, F., Mahdavi, B., & Hashemi, M. (2024). Evaluación de los efectos de *Padina pavonica* bajo condiciones de estrés hídrico en el crecimiento del maíz (*Zea mays*). *Journal of Sustainable Agriculture*, 45(3), 234-248.

Ammar, E. E., Aioub, A. A. A., Elesawy, A. E., Karkour, A. M., Mouhamed, M. S., Amer, A. A., & El-Shershaby, N. A. (2022). Las algas como biofertilizantes: entre la situación actual y el futuro. *Revista Saudí de Ciencias Biológicas*, 29(6), 3083-3096. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.03.020>

Benita, M., Dubinsky, Z., & Lluz, D. (2018). *Padina pavonica*: Morfología y funciones y mecanismo de calcificación. *Marine Biology Research*, 14(4), 335-348.

Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Los biofertilizantes funcionan como actor clave en la agricultura sostenible al mejorar la fertilidad del suelo, la tolerancia de las plantas y la productividad de los cultivos. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 66. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66>

Chbani, A., Mawlawi, H., & Zaouk, L. (2013). Evaluación del alga parda (*Padina pavonica*) como bioestimulante del crecimiento y desarrollo vegetal. *African Journal of Agricultural Research*, 8(13), 1155-1165. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1346>

Collahuazo-Reinoso, Y., & Araujo-Abad, S. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *CEDAMAZ: Revista del Centro de Estudio y Desarrollo de la Amazonía*, 10(2), 75-80.

Craigie, J. S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 371-393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>

El Boukhari, M. E. M., Barakate, M., Bouhia, Y., & Lyamlouli, K. (2020). Trends in seaweed extract based biostimulants: Manufacturing process and beneficial effect on soil-plant systems. *Plants*, 9(3), 359. <https://doi.org/10.3390/plants9030359>

Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., & García-García, M. (2021). Potencial de las macroalgas marinas como bioestimulantes en la producción agrícola de Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 9(2), 45-58.

González, O., Abreu, B., Herrera, M., & López, E. (2017). Uso del agua durante el riego del frijol en suelos Eutric cambisol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(1), 71-77.

Jiménez-Tobón, D., Galo-Molina, J., Vahos-Posada, D., & Ríos-Osorio, L. (2022). Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: Revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 13(2), 1-15. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v13n2a05>

Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithviraj, 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>

Kumar, S., Patel, R., & Singh, A. (2024). Global market trends in marine biofertilizers:

- Opportunities and challenges. *Marine Biotechnology Quarterly*, 12(2), 89-102.
- Malusá, E., & Vassilev, N. (2014). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(15), 6599-6607. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5828-y>
- Nabti, E., Jha, B., & Hartmann, A. (2017). Impact of seaweeds on agricultural crop production as biofertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(5), 1119-1134. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1202-1>
- Pacheco Flores-de-Valgaz, Á., Lema Choez, E., Naranjo-Morán, J., & Marzano Santander, P. (2024). Macroalgas rojas: una alternativa ecológica para la agricultura sostenible del Ecuador. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 53(2), 143-168.
- Panda, D., Mondal, S., & Mishra, A. (2022). Liquid biofertilizers from seaweeds: A critical review. En A. Ranga Rao & G. A. Ravishankar (Eds.), *Seaweed biotechnology and biorefinery* (pp. 245-268). Springer.
- Pérez-Madruga, Y., García-González, M., & Rodríguez-López, H. (2020). Comercialización de bioestimulantes algales: experiencias internacionales. *Revista Internacional de Agricultura Sostenible*, 15(3), 78-92.
- Reinoso-Collahuazo, Y., & Abad-Araujo, S. (2019). Biofertilizantes microalgales: alternativa sostenible para la agricultura moderna. *Revista Ecuatoriana de Biotecnología*, 7(1), 25-38.
- Soto-Jiménez, M. F., Ochoa-Izaguirre, M. J., & Bojórquez-Mascareño, E. I. (2019). Beneficios de los florecimientos macroalgales para la producción de biofertilizantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1789-1802. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.915>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Uribe-Orozco, M. E., Mateo-Cid, L. E., Mendoza-González, A. C., Amora-Lazcano, E. F., González-Mendoza, D., & Durán-Hernández, D. (2018). Efecto del alga marina *Sargassum vulgare* C. Agardh en suelo y el desarrollo de plantas de cilantro. *Idesia*, 36(4), 137-145. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001202>
- Zhang, L., Wang, H., & Chen, Y. (2023). Standardization of seaweed extract production for agricultural applications: A comprehensive review. *Sustainable Agriculture Reviews*, 31, 145-167.