

Aplicación integrada de roca fosfórica, lixiviado de lombriz y algas marinas en albahaca

Integrated application of rock phosphate, vermicompost leachate and seaweed extract in basil

Juan Carlos Vázquez-Angulo¹ , Isidro Bazante-González¹ , Ángel Manuel Suarez-Hernández¹ , Enrique Ignacio Sánchez-González¹ , Raúl Enrique Valle-Gough² , Fidel Núñez-Ramírez^{2*} 

¹Facultad de Ingeniería y Negocios San Quintín, Universidad Autónoma de Baja California. CP. 22930. San Quintín, Baja California, México.

²Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León, CP. 21705. Mexicali, Baja California, México.

*Autor de correspondencia: fidel.nunez@uabc.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 05 de marzo 2026

Aceptado: 19 de agosto 2026

RESUMEN. El manejo nutrimental orgánico representa un reto para optimizar el crecimiento y el rendimiento de albahaca (*Ocimum basilicum* L.), debido a la liberación gradual de nutrientes y a la complejidad de las interacciones suelo-planta. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto combinado de roca fosfórica como fertilización de fondo y la aplicación líquida de lixiviado de lombriz y extracto de algas marinas sobre el estado nutrimental, crecimiento y rendimiento del cultivo. El experimento se estableció bajo invernadero utilizando un diseño de parcelas divididas, donde se evaluó la presencia o ausencia de roca fosfórica y tres tratamientos líquidos (algas marinas, lixiviado de lombriz y su combinación). Se determinaron variables nutrimentales, fisiológicas, de crecimiento y biomasa. La interacción entre factores influyó significativamente en el índice de clorofila, el índice de vegetación normalizado (NDVI) y componentes del rendimiento. A pesar de que las concentraciones tempranas de NO₃⁻, K⁺ y sólidos solubles no mostraron diferencias, la combinación de roca fosfórica con lixiviado de lombriz y algas marinas incrementó la altura de planta, número de hojas y biomasa fresca total. Los resultados evidencian que un manejo nutrimental orgánico integrado mejora el desempeño agronómico de la albahaca y constituye una alternativa viable para fortalecer sistemas de producción sostenible.

Palabras clave: Extracto celular, horticultura sustentable, nitratos, nutrición orgánica, potasio.

ABSTRACT. Organic nutrient management represents a challenge for optimizing basil (*Ocimum basilicum* L.) growth and yield due to the gradual release of nutrients and the complexity of soil-plant interactions. This study aimed to evaluate the combined effect of rock phosphate as basal fertilization and the liquid application of vermicompost leachate and seaweed extract on the nutritional status, growth, and yield of basil. The experiment was conducted under greenhouse conditions using a split-plot design, evaluating the presence or absence of rock phosphate and three liquid treatments (seaweed extract, vermicompost leachate, and their combination). Nutritional, physiological, growth, and biomass variables were assessed. Factor interactions significantly affected chlorophyll index, normalized vegetation index (NDVI), and yield components. Although early NO₃⁻, K⁺, and soluble solids concentrations showed no significant differences, the combination of rock phosphate with vermicompost leachate and seaweed extract increased plant height, leaf number, and total fresh biomass. These results indicate that integrated organic nutrient management improves basil agronomic performance and represents a viable strategy to enhance sustainable production systems.

Keywords: Cellular extract, nitrates, organic nutrition, potassium, sustainable horticulture.

Como citar: Vázquez-Angulo JC, Bazante-González I, Suarez-Hernández AM, Sánchez-González EI, Valle-Gough RE, Núñez-Ramírez F, (2026) Aplicación integrada de roca fosfórica, lixiviado de lombriz y algas marinas en albahaca. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e5174. DOI: 10.19136/era.a13n3.5174.

INTRODUCCIÓN

La albahaca (*Ocimum basilicum* L.) es una especie aromática de importancia económica y nutracéutica, ampliamente cultivada en sistemas hortícolas intensivos y protegidos. En los últimos años, su producción bajo manejo orgánico ha adquirido relevancia debido a la demanda de alimentos obtenidos con prácticas sostenibles (Backiam *et al.* 2023). La fertilización orgánica se basa en el uso de insumos biológicos y minerales naturales que mejoran la eficiencia nutrimental y la calidad del cultivo (Pham *et al.* 2022, Johnson *et al.* 2024). En albahaca, se ha reportado que el manejo nutrimental influye en la acumulación de compuestos fenólicos y en la calidad fisiológica del follaje (Dasgan *et al.* 2022, Jamwal *et al.* 2025), lo que sugiere que estrategias alternativas de fertilización pueden modificar tanto el crecimiento como el rendimiento del cultivo.

El vermicompost y sus derivados líquidos han mostrado efectos positivos en cultivos hortícolas han mostrado efectos positivos sobre el crecimiento y la absorción de nutrientes en cultivos hortícolas, atribuidos al contenido de nutrientes solubles, sustancias húmicas y actividad microbiana (Sáez *et al.* 2021, Chekwube *et al.* 2023). Cuando se aplican al suelo o vía riego, estos insumos pueden mejorar la absorción de nutrientes y favorecer el estado fisiológico de la planta. En sistemas orgánicos, el lixiviado de lombriz representa una alternativa para fortalecer el estado nutrimental del cultivo mediante la mejora del ambiente rizosférico y la eficiencia de absorción (Rezaei-Chiyaneh *et al.* 2021).

Los extractos de algas marinas se consideran bioestimulantes vegetales debido a la presencia de fitohormonas, polisacáridos y compuestos fenólicos que influyen en el crecimiento y la respuesta fisiológica de las plantas (Ali *et al.* 2021, Johnson *et al.* 2024). Aplicados al suelo o mediante fertirrigación, pueden estimular el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes, mejorando el estado de salud de la planta (Sleighter *et al.* 2023). Por otra parte, la roca fosfórica constituye una fuente natural de fósforo utilizada en agricultura orgánica, cuya disponibilidad depende de procesos biológicos del suelo y de la actividad microbiana (Said Aljalaly *et al.* 2021, Barin *et al.* 2022). La integración de una fuente fosfatada basal con bioestimulantes aplicados vía riego podría favorecer el aprovechamiento del fósforo y mejorar el desempeño productivo del cultivo. A pesar de la evidencia sobre los efectos individuales del vermicompost, los extractos de algas y la roca fosfórica, existe información limitada acerca de su efecto combinado en albahaca bajo manejo orgánico. Son escasos los estudios que integren una enmienda fosfatada aplicada en presiembra con bioestimulantes incorporados vía riego durante el ciclo del cultivo y que evalúen simultáneamente estado nutrimental, crecimiento y rendimiento. Esta limitación dificulta la formulación de esquemas nutrimentales integrales para sistemas orgánicos de aromáticas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el estado nutrimental, el crecimiento y el rendimiento de *Ocimum basilicum* L. bajo manejo orgánico mediante la combinación de roca fosfórica, lixiviado de lombriz y extracto de algas marinas aplicados vía sistema de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Negocios San Quintín de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicada en el valle de San Quintín, Baja California, México (30°39'00" LN, 115°57'53" LO), a una altitud de 20 msnm. El clima de la región se clasifica como muy seco templado, con veranos cálidos y áridos e inviernos frescos y prolongados. Durante el ciclo experimental otoño-invierno 2021-2022, la temperatura media osciló entre 13 y 31 °C.

El experimento se estableció bajo condiciones de invernadero tipo túnel, con una superficie total de 48 m² (6 × 8 m). Previo al establecimiento del experimento se realizó un análisis químico del suelo, el cual lo identificó con una textura franca, pH ligeramente alcalino (7.6) y conductividad eléctrica media (3.03 dS m⁻¹), con alto contenido de bicarbonatos (195 mg L⁻¹) y concentraciones elevadas de sodio y cloro (12.87 y 24.11 me L⁻¹, respectivamente), así como con un contenido de fósforo disponible de 12.0 ppm (Olsen *et al.* 1954), 8.0 g kg⁻¹ de materia orgánica y nitrógeno total de 162 mg kg⁻¹; condiciones típicas de los suelos agrícolas del valle de San Quintín.

Establecimiento del cultivo

La siembra se realizó el 16 de octubre de 2021 en charolas de germinación, utilizando sustrato comercial Berger BM2 (Saint-Modeste, Canadá). El trasplante se efectuó el 4 de noviembre de 2021 en camas de 1.0 m de ancho, establecidas a doble hilera, con una distancia de 30 cm entre hileras y 20 cm entre plantas, lo que resultó en una densidad de población aproximada de 10 plantas m². La variedad utilizada fue Dark Opal (KingSeeds, México). Las plántulas se trasplantaron cuando tuvieron 40 días de edad y dos a tres hojas verdaderas y una altura promedio de siete centímetros. El trasplante se realizó manualmente durante las primeras horas del día para reducir el estrés térmico.

Manejo agronómico

El cultivo se manejó bajo un sistema de producción orgánica dentro del invernadero. El riego se aplicó mediante sistema de goteo, con una duración promedio de una hora por evento, ajustado de acuerdo con la humedad del suelo y las condiciones ambientales. En general, se procuró mantener el suelo cercano a capacidad de campo, evitando que las plantas presentaran estrés hídrico.

Todos los tratamientos recibieron una fertilización orgánica base consistente en aplicaciones semanales a través del sistema de riego por goteo, de una mezcla de té de composta (125 L ha⁻¹), *Trichoderma harzianum* en mezcla con melaza (2.4 g + 500 g, diluidos en 100 L de agua), guano de aves marinas (400 g en 125 L ha⁻¹; 3% N, 2% P, 2% K; Algas Pacific, Ensenada, México; <https://algaspacific.com/nutrientes/larusoil/>) y urea orgánica a base de gallinaza (15 L ha⁻¹), preparada a partir de 2 kg de gallinaza diluidos en 10 L de agua y mezclados con cinco frutos de limón (*Citrus limon* L.), previamente fermentados durante 10 días. Esta fertilización se aplicó uniformemente en todos los tratamientos y no se consideró factor experimental.

De manera preventiva, cada semana se aplicaron extractos naturales de neem (*Azadirachta indica*, 1.5 L ha⁻¹; CYR NEEM CE 80, Culiacán, México; <https://uribsin.com/producto/cyr-neem-ce-80/>), aceite esencial de ajo (*Allium sativum*, 5 mL L⁻¹; Extra Ajo-N, FIASA, Culiacán, México) y extracto

de mostaza (*Sinapis alba*, 15 mL L⁻¹; Mix M, Agrosanidad, Los Mochis, México) en forma foliar. No se registraron incidencias severas de plagas o enfermedades durante el ciclo del cultivo.

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se estableció bajo un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones, distribuidas en bloques completamente al azar. La aplicación de roca fosfórica se consideró como el factor principal (con y sin aplicación de 0.1 kg m²), mientras que el factor secundario estuvo conformado por cuatro tratamientos de biofertilizantes líquidos: lixiviado de lombriz (30 L ha⁻¹; Bio Lixi, Sinaloa, México), extracto de algas marinas (6 L ha⁻¹; Bio Ocean, Sinaloa, México), la combinación de ambos (6 L ha⁻¹ de extracto de algas marinas + 30 L ha⁻¹ de lixiviado de lombriz; Bio Liximix, Sinaloa, México) y un testigo (control) sin aplicación.

El experimento estuvo compuesto por seis camas de cultivo. Tres recibieron la aplicación de roca fosfórica como fertilización de fondo y tres se mantuvieron sin enmienda. Cada cama representó una parcela principal. Dentro de cada cama, se distribuyeron aleatoriamente en subparcelas los cuatro tratamientos de biofertilizantes líquidos (factor secundario). Cada subparcela estuvo integrada por aproximadamente 46 plantas, considerando únicamente las plantas centrales como área útil.

Durante la preparación de las camas, la roca fosfórica se incorporó al suelo, e inmediatamente después, se realizó el trasplante. Posteriormente, se instaló la cintilla de riego y se cubrió cada cama con plástico bicolor (acolchado agrícola 200 M 1.20 M calibre 85 plata negro liso, Suncover®). A los cinco días después del trasplante (ddt), comenzó la aplicación de los biofertilizantes a través del sistema de riego. Cada aplicación se realizó en forma semanal durante siete ocasiones.

Variables evaluadas

Durante el ciclo de crecimiento se evaluaron variables nutrimentales, fisiológicas y de rendimiento. A los 15, 23 y 31 días después del trasplante (ddt), se determinó la concentración de nitratos (NO₃⁻), potasio (K⁺) y sólidos solubles totales (SST: °Brix) en extracto celular de pecíolo. Para ello, se muestreó la hoja más recientemente madura de cinco plantas por subparcela, conformando una muestra compuesta por subparcela. La extracción del jugo celular se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Núñez-Ramírez *et al.* (2017). Las concentraciones de NO₃⁻ y K⁺ se determinaron mediante sensores portátiles LAQUAtwin (NO3-11 y K-11), mientras que los SST se cuantificaron con un refractómetro manual SAMRT-SENSOR (ST335A; Guangdong, China).

A los 13, 27 y 37 ddt se determinó el índice de clorofila (IC) y la temperatura foliar. Se realizaron cuatro lecturas por planta en cinco plantas por subparcela. El IC se midió con un medidor SPAD-502 Plus (Konica Minolta, Japón), mientras que la temperatura foliar se registró con un termómetro infrarrojo (TASI, Eujgoov, China).

El crecimiento del cultivo se evaluó a los 3, 13, 19, 27, 33 y 37 ddt mediante el índice de vegetación normalizado (NDVI), utilizando un sensor GreenSeeker (Trimble Agriculture Division; Co. USA). El NDVI se ha empleado como indicador indirecto del vigor vegetal y la biomasa en cultivos hortícolas (Mendoza-Pérez *et al.* 2024).

Finalmente, desde los 3 hasta los 37 ddt, se midió la altura de planta con una cinta métrica. A los 40 ddt se seleccionaron diez plantas de la parte central de cada subparcela y se cosecharon para determinar el número de hojas (NH), el peso fresco de hojas (PFH), peso fresco de tallo (PFT), peso fresco aéreo (PFH+PFT) y peso fresco de raíz (PFR). Para esta determinación se utilizó una balanza de precisión (Torrey, 0LPCR20, México).

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo factorial correspondiente a un diseño de parcelas divididas, considerando la aplicación de roca fosfórica como factor principal y los biofertilizantes líquidos como factor secundario, así como su interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey al 0.05. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab® versión 19 (Minitab Inc., State College, PA, EE. UU.).

RESULTADOS

Concentración de NO_3^- en extracto celular de pecíolo

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida ($\text{AL} \times \text{FF}$) no fue significativa en ninguna de las fechas evaluadas ($P \leq 0.05$). La concentración de NO_3^- en el extracto celular de pecíolo no presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de la fertilización de fondo con roca fosfórica en ninguna de las fechas evaluadas (Tabla 1). A los 15 ddt, los valores oscilaron entre 1 778 y 1 731 mg L^{-1} ; a los 23 ddt los valores fueron entre los 2 008 y 2 250; y a los 31 ddt los valores fueron entre 1 400 y 1 368 mg L^{-1} . La aplicación líquida de biofertilizantes tampoco mostró efecto significativo sobre la concentración de NO_3^- en las tres fechas evaluadas ($P > 0.05$). A los 15 ddt, los valores oscilaron entre 1 626 y 1 888 mg L^{-1} ; a los 23 ddt fueron entre los 1 825 y 2 263 mg L^{-1} ; finalmente a los 31 ddt los valores fueron entre los 1 271 y 1 563 mg L^{-1} .

Tabla 1. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre la concentración de NO_3^- en el cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor	NO_3^- (mg L^{-1}) 15 ddt	NO_3^- (mg L^{-1}) 23 ddt	NO_3^- (mg L^{-1}) 31 ddt
Fertilización de fondo			
Con roca fosfórica	1 778	2 008	1 400
Sin roca fosfórica	1 731	2 250	1 368
Aplicación líquida			
Algas marinas	1 626	2 300	1 563
Lixiviado de lombriz	1 888	2 263	1 271
Lixiviado + algas	1 750	1 825	1 318
Significancia			
Fertilización de fondo (FF)	0.825	0.483	0.837
Aplicación líquida (AL)	0.609	0.458	0.284
Interacción FF $\times$ AL	0.101	0.813	0.597

ddt: días después del trasplante.

Concentración de K⁺ en extracto celular de pecíolo

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida (AL × FF) no fue significativa en ninguna de las fechas evaluadas ($P > 0.05$; Tabla 2). Asimismo, la concentración de K⁺ en el extracto celular de pecíolo no mostró diferencias significativas ($P > 0.05$) por efecto de la fertilización de fondo con roca fosfórica en ninguna de las fechas evaluadas. Solo a los 15 ddt, la aplicación líquida de algas marinas y lixiviado de lombriz, presentaron las mayores concentraciones de K⁺ ($\approx 4\,059\text{ mg L}^{-1}$) en comparación con la mezcla entre ellas ($3\,300\text{ mg L}^{-1}$).

Tabla 2. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre la concentración de K⁺ en el cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor	K ⁺ (mg L ⁻¹) 15 ddt	K ⁺ (mg L ⁻¹) 23 ddt	K ⁺ (mg L ⁻¹) 31 ddt
Fertilización de fondo			
Con roca fosfórica	3 983	3 142	3 958
Sin roca fosfórica	3 626	3 433	3 842
Aplicación líquida			
Algas marinas	4 094 ^{at}	3 238	3 875
Lixiviado de lombriz	4 025 ^a	3 500	3 800
Lixiviado + algas	3 300 ^b	3 125	4 025
Significancia			
Fertilización de fondo (FF)	0.126	0.449	0.554
Aplicación líquida (AL)	0.016	0.711	0.634
Interacción FF × AL	0.877	0.663	0.567

†: Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey: $p < 0.05$); ddt: días después del trasplante.

Sólidos solubles totales (SST)

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida (AL × FF) no fue significativa en ninguna de las fechas evaluadas ni en cada factor evaluado ($P > 0.05$), y en general el valor promedio fue de 1.60, con un rango de 1.12 a 2.08 °Brix (Tabla 3).

Tabla 3. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre la concentración de sólidos solubles totales (SST; °Brix) en el cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor	°Brix 15 ddt	°Brix 23 ddt	°Brix 31 ddt
Fertilización de fondo			
Con roca fosfórica	1.79	1.67	1.50
Sin roca fosfórica	2.08	1.33	1.55
Aplicación líquida			
Algas marinas	2.00	1.12	1.46
Lixiviado de lombriz	2.00	1.31	1.50
Lixiviado + algas	1.81	1.31	1.62
Significancia			
Fertilización de fondo (FF)	0.156	0.321	0.875
Aplicación líquida (AL)	0.674	0.566	0.931
Interacción FF × AL	0.569	0.118	0.559

Índice de clorofila y temperatura foliar

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida (AL × FF) fue significativa para el índice de clorofila a los 13 y 27 ddt ($P = 0.046$ y $P = 0.035$, respectivamente; Tabla 4). A los 37 ddt, el índice de clorofila mostró diferencias significativas por efecto de la fertilización de fondo con roca fosfórica, y presentó los mayores valores cuando se aplicó roca fosfórica al suelo (28.06 versus 26.62, $P = 0.010$). Por otro lado, la temperatura foliar presentó interacción AL × FF significativa en las tres fechas evaluadas ($P < 0.05$), lo que indica respuestas diferenciadas entre combinaciones de tratamientos.

Tabla 4. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre el índice de clorofila y temperatura foliar en el cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor/variable	Índice de clorofila			Temperatura foliar (°C)		
	13 ddt	27 ddt	37 ddt	13 ddt	27 ddt	37 ddt
Fertilización de fondo						
Con roca fosfórica	44.95 ^{at}	28.10 ^a	28.06 ^a	26.60	26.70	24.98 ^a
Sin roca fosfórica	39.45 ^b	31.43 ^b	26.62 ^b	25.88	26.07	25.87 ^b
Aplicación líquida						
Algas marinas	43.09	30.22	26.64	26.41	26.39	25.12
Lixiviado de lombriz	42.22	30.30	27.48	25.87	26.13	25.58
Lixiviado + algas	41.55	28.77	27.90	26.44	26.64	25.58
Significancia						
Fertilización de fondo (FF)	< 0.0001	0.003	0.010	0.061	0.092	< 0.0001
Aplicación líquida (AL)	0.422	0.430	0.172	0.401	0.536	0.248
Interacción FF × AL	0.046	0.035	0.870	0.037	0.008	0.006

†: Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey: $p < 0.05$); ddt: días después del trasplante.

A los 13 ddt (Figura 1A), las plantas con roca fosfórica presentaron valores del índice de clorofila superiores cuando se aplicaron el lixiviado de lombriz y la combinación de lixiviado + algas, mientras que los valores menores se tuvieron cuando no se aplicó roca fosfórica en los tratamientos de lixiviado de lombriz y la combinación de lixiviado + algas. A los 27 ddt (Figura 1B), se mantuvo el efecto de interacción, observándose diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. En esta fecha, el tratamiento sin roca fosfórica con lixiviado de lombriz presentó el valor más alto de índice de clorofila, mientras que los tratamientos con roca fosfórica combinados con lixiviado de lombriz y lixiviado + algas registraron los valores más bajos.

Para el caso de la temperatura foliar, a los 13 ddt (Figura 2A), el tratamiento con lixiviado de lombriz en presencia de roca fosfórica presentó el valor más alto de temperatura foliar, mientras que el tratamiento sin roca fosfórica con lixiviado de lombriz mostró uno de los valores más bajos. En los tratamientos con algas marinas y con la combinación lixiviado + algas, las temperaturas foliares fueron similares entre plantas con y sin roca fosfórica.

A los 27 ddt (Figura 2B), se mantuvo el efecto de interacción, registrándose nuevamente valores más altos de temperatura foliar en el tratamiento con lixiviado de lombriz en combinación con roca

fosfórica, mientras que el mismo tratamiento sin roca fosfórica presentó valores significativamente menores. En los tratamientos con algas marinas y con lixiviado + algas, las diferencias entre presencia y ausencia de roca fosfórica fueron menos marcadas. A los 37 ddt (Figura 2C), el tratamiento sin roca fosfórica en combinación con algas marinas presentó el valor más alto de temperatura foliar, mientras que el tratamiento con roca fosfórica bajo algas marinas registró el valor más bajo. En los tratamientos con lixiviado de lombriz y con lixiviado + algas, las temperaturas foliares fueron estadísticamente similares entre plantas con y sin roca fosfórica.

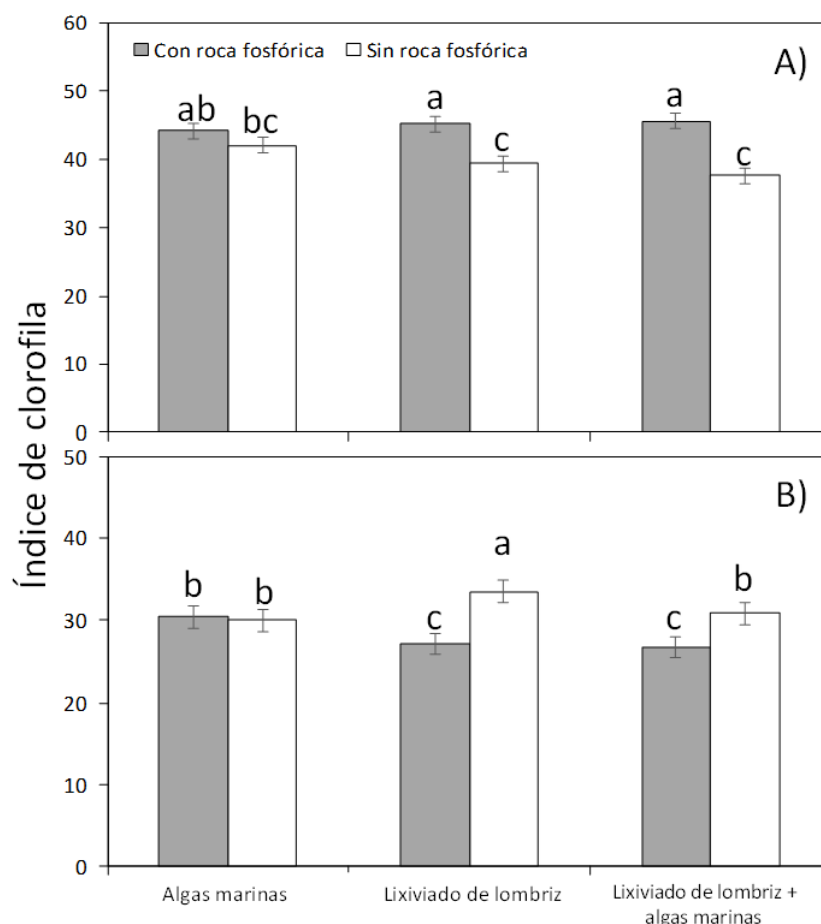


Figura 1. Interacción de la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de algas marinas, lixiviado de lombriz, y su combinación sobre el índice de clorofila (AL × FF), a los 13 (A) y 27 días después del trasplante (B) en el cultivo de albahaca.

Índice de vegetación normalizada (NDVI)

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida (AL × FF) sobre la variable índice de vegetación normalizado (NDVI) fue significativa a los 27 y 37 ddt ($P = 0.039$ y $P = 0.001$, respectivamente) (Tabla 5). Por su parte, el NDVI mostró diferencias significativas por efecto de la fertilización de fondo con roca fosfórica en el resto de las fechas evaluadas. Desde los 3 ddt, las plantas con roca fosfórica presentaron valores superiores (0.33) respecto a aquellas sin roca fosfórica (0.25) ($P < 0.0001$) y la tendencia continuó hasta el final del estudio ($P \leq 0.020$).

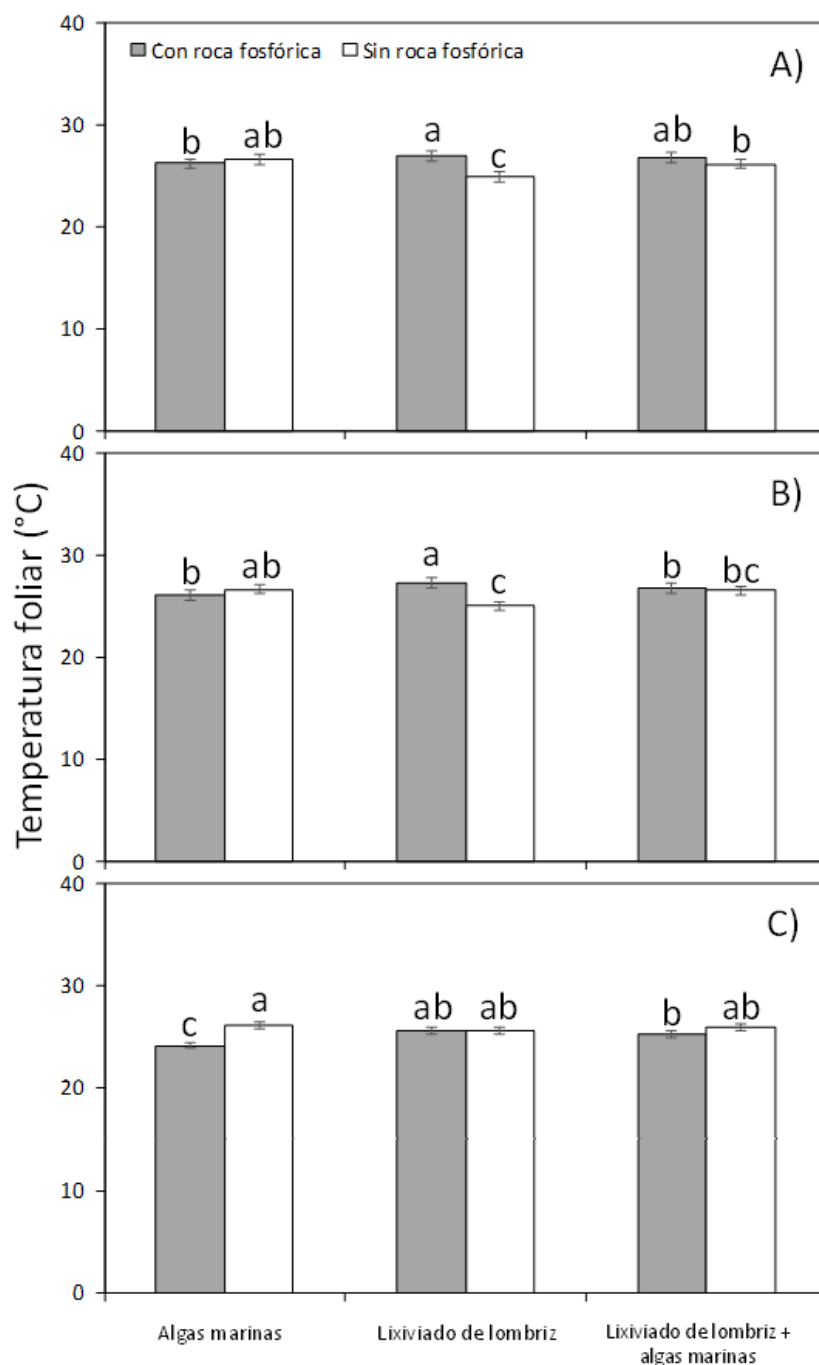


Figura 2. Interacción de la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de algas marinas, lixiviados de lombriz, y su combinación (AL × FF), sobre la temperatura foliar (°C) a los 13 (A), 27 (B) y 37 días después del trasplante (C) en el cultivo de albahaca.

Para el caso de la aplicación líquida de biofertilizantes, estos también influyeron significativamente en el NDVI durante todo el estudio, excepto a los 27 y 37 ddt. Usualmente los tratamientos con algas marinas y lixiviado de lombriz presentaron valores de NDVI superiores y estadísticamente

similares entre sí, mientras que el tratamiento combinado lixiviado + algas registró los valores más bajos ($P \leq 0.020$).

Tabla 5. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre el índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor	3 ddt	13 ddt	19 ddt	27 ddt	33 ddt	37 ddt
Fertilización de fondo						
Con roca fosfórica	0.33 ^{a†}	0.47 ^a	0.48 ^a	0.65 ^a	0.68 ^a	0.57 ^a
Sin roca fosfórica	0.25 ^b	0.42 ^b	0.41 ^b	0.63 ^b	0.66 ^b	0.43 ^b
Aplicación líquida						
Algas marinas	0.30 ^a	0.45 ^a	0.45 ^a	0.65 ^a	0.68 ^a	0.50
Lixiviado de lombriz	0.31 ^a	0.46 ^a	0.48 ^a	0.66 ^a	0.68 ^a	0.51
Lixiviado + algas	0.27 ^b	0.43 ^b	0.41 ^b	0.62 ^b	0.66 ^b	0.48
Significancia						
Fertilización de fondo (FF)	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.020	< 0.0001	< 0.0001
Aplicación líquida (AL)	0.012	0.020	0.020	< 0.0001	0.003	0.627
Interacción FF × AL	0.399	0.902	0.093	0.039	0.465	0.001

†: Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey: $p < 0.05$); ddt: días después del trasplante.

La interacción entre la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de biofertilizantes fue significativa para el NDVI a los 27 y 37 ddt (Figura 3). A los 27 ddt (Figura 3A), las plantas con roca fosfórica presentaron valores de NDVI significativamente mayores en los tratamientos con algas marinas y con lixiviado de lombriz, en comparación con sus respectivos tratamientos sin roca fosfórica. En el tratamiento combinado lixiviado + algas no se observaron diferencias estadísticas entre plantas con y sin roca fosfórica. Los valores más altos de NDVI se registraron en los tratamientos con algas marinas y lixiviado de lombriz en presencia de roca fosfórica, mientras que los valores más bajos correspondieron a los tratamientos sin roca fosfórica bajo algas marinas.

A los 37 ddt (Figura 3B), la aplicación de roca fosfórica en combinación con algas marinas o lixiviado de lombriz, presentó los valores más altos de NDVI, seguido por el tratamiento sin roca fosfórica con algas marinas o lixiviado de lombriz. La combinación de algas marinas y lixiviado de lombriz con o sin roca fosfórica, tuvo los valores más bajos de NDVI. Estos resultados indican que la respuesta del NDVI depende de la combinación entre fertilización fosfatada y la aplicación líquida, en las etapas intermedia y final del ciclo del cultivo.

Altura de la planta

La altura de planta mostró diferencias significativas por efecto de la fertilización de fondo con roca fosfórica en todas las fechas evaluadas (Tabla 6) ($P < 0.0001$). Por otra parte, la aplicación líquida de biofertilizantes también influyó significativamente en la altura de planta durante todo el ciclo del cultivo. Desde los 3 hasta los 33 ddt, los tratamientos con algas marinas y lixiviado de lombriz presentaron valores superiores y estadísticamente similares entre sí, mientras que el tratamiento combinado lixiviado + algas mostró las menores alturas ($P < 0.0001$). Finalmente, a los 37 ddt el

lixiviado de lombriz presentó la mayor altura (52.59 cm), seguido por los tratamientos con algas marinas y con lixiviado + algas, los cuales no difirieron entre sí.

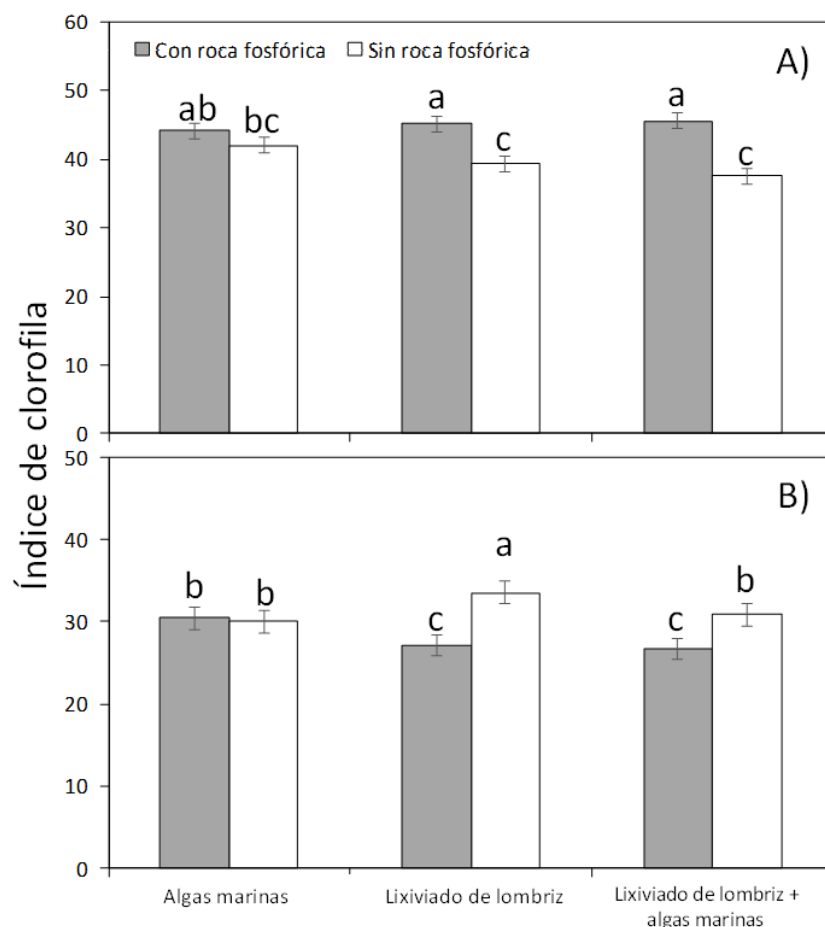


Figura 3. Interacción de la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de algas marinas, lixiviados de lombriz, y su combinación (AL × FF), sobre el NDVI a los 27 (A), y 37 (B) días después del trasplante en el cultivo de albahaca.

Rendimiento y biomasa de la planta

La interacción entre fertilización de fondo y aplicación líquida (AL × FF) fue significativa para NH, PFH, peso fresco del tallo, PFA, PFR y biomasa fresca total ($P \leq 0.029$), lo que indica respuestas diferenciadas de los componentes del rendimiento en función de la combinación de ambos factores (Tabla 7).

Para el peso fresco de las hojas (Figura 4A), el tratamiento con lixiviado de lombriz + algas marinas en presencia de roca fosfórica presentó el valor más alto, mientras que los tratamientos con algas marinas (sin aplicación de roca fosfórica) y lixiviado de lombriz (con y sin roca fosfórica), registraron los valores más bajos. Por otro lado, el peso fresco del tallo (Figura 4B) con el tratamiento con lixiviado de lombriz + algas marinas en combinación con roca fosfórica presentó el mayor valor, mientras que el resto de las combinaciones no mostraron diferencias estadísticas entre

sí. Finalmente, el peso fresco de la parte aérea (Figura 4C) presentó la misma tendencia que el peso fresco del tallo.

Tabla 6. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre la altura de plantas del cultivo de albahaca bajo invernadero.

Factor	3 ddt	13 ddt	19 ddt	27 ddt	33 ddt	37 ddt
Fertilización de fondo (FF)						
Con roca fosfórica	6.18 ^{a†}	9.44 ^a	14.82 ^a	22.09 ^a	26.83 ^a	56.94 ^a
Sin roca fosfórica	5.38 ^b	8.21 ^b	10.83 ^b	19.88 ^b	24.97 ^b	45.15 ^b
Aplicación líquida (AL)						
Algas marinas	5.73 ^a	8.91 ^a	13.08 ^a	20.92 ^a	25.68 ^a	50.26 ^b
Lixiviado de lombriz	6.21 ^a	9.48 ^a	13.96 ^a	22.31 ^a	27.22 ^a	52.59 ^a
Lixiviado + algas	5.42 ^b	8.09 ^b	11.43 ^b	19.74 ^b	24.79 ^b	50.28 ^b
Significancia						
Fertilización de fondo (FF)	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Aplicación líquida (AL)	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.001
Interacción FF × AL	0.160	0.670	0.636	0.903	0.585	0.670

†: Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey: $p < 0.05$); ddt: días después del trasplante.

Tabla 7. Adición de roca fosfórica y aplicación líquida de lixiviado de lombriz y algas marinas, sobre el número de hojas, peso fresco de las hojas, peso fresco del tallo, peso fresco aéreo, peso fresco de raíz y biomasa fresca total de plantas de albahaca bajo invernadero.

Factor/variable	NH‡	PFH	PFT	PFA	PFR	BFT
Fertilización de fondo						
Con roca fosfórica	50.75 ^{a†}	18.05 ^a	9.84 ^a	27.89 ^a	3.10	31.00 ^a
Sin roca fosfórica	47.36 ^b	16.29 ^b	8.30 ^b	24.60 ^b	2.46	27.07 ^b
Aplicación líquida						
Algas marinas	49.45 ^a	16.00 ^b	8.08 ^b	24.09 ^b	2.63 ^b	26.73 ^b
Lixiviado de lombriz	52.13 ^a	19.64 ^a	10.71 ^a	30.35 ^a	2.93 ^a	33.29 ^a
Lixiviado + algas	45.59 ^b	15.88 ^b	8.42 ^a	24.30 ^b	2.78 ^{ab}	27.09 ^b
Significancia						
Fertilización de fondo (FF)	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.124	< 0.0001
Aplicación líquida (AL)	0.012	0.004	< 0.0001	0.001	< 0.0001	< 0.0001
Interacción FF × AL	0.029	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.013	< 0.0001

†: Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey: $p < 0.05$). ‡: NH: número de hojas; PFH: peso fresco de las hojas; PFT: peso fresco del tallo; PFA: peso fresco aéreo (PFH+PFT); PFR: Peso fresco de la raíz; BFT: biomasa fresca total (PFA+PFR).

El tratamiento con lixiviado de lombriz + algas marinas en presencia de roca fosfórica presentó el mayor número de hojas (Figura 5A), mientras que los tratamientos con lixiviado de lombriz y con algas marinas sin roca fosfórica registraron valores menores. Por otro lado, el peso fresco de raíz fue mayor en el tratamiento con lixiviado de lombriz + algas marinas en combinación con roca fosfórica (Figura 5B), mientras que el resto de los tratamientos sin roca fosfórica mostraron los valores más bajos. Finalmente, el mayor biomasa fresca total resultó en el tratamiento con lixiviado

de lombriz + algas marinas en presencia de roca fosfórica (Figura 5C), diferenciándose estadísticamente del resto de las combinaciones, los cuales presentaron los valores más bajos y fueron estadísticamente iguales entre ellos.

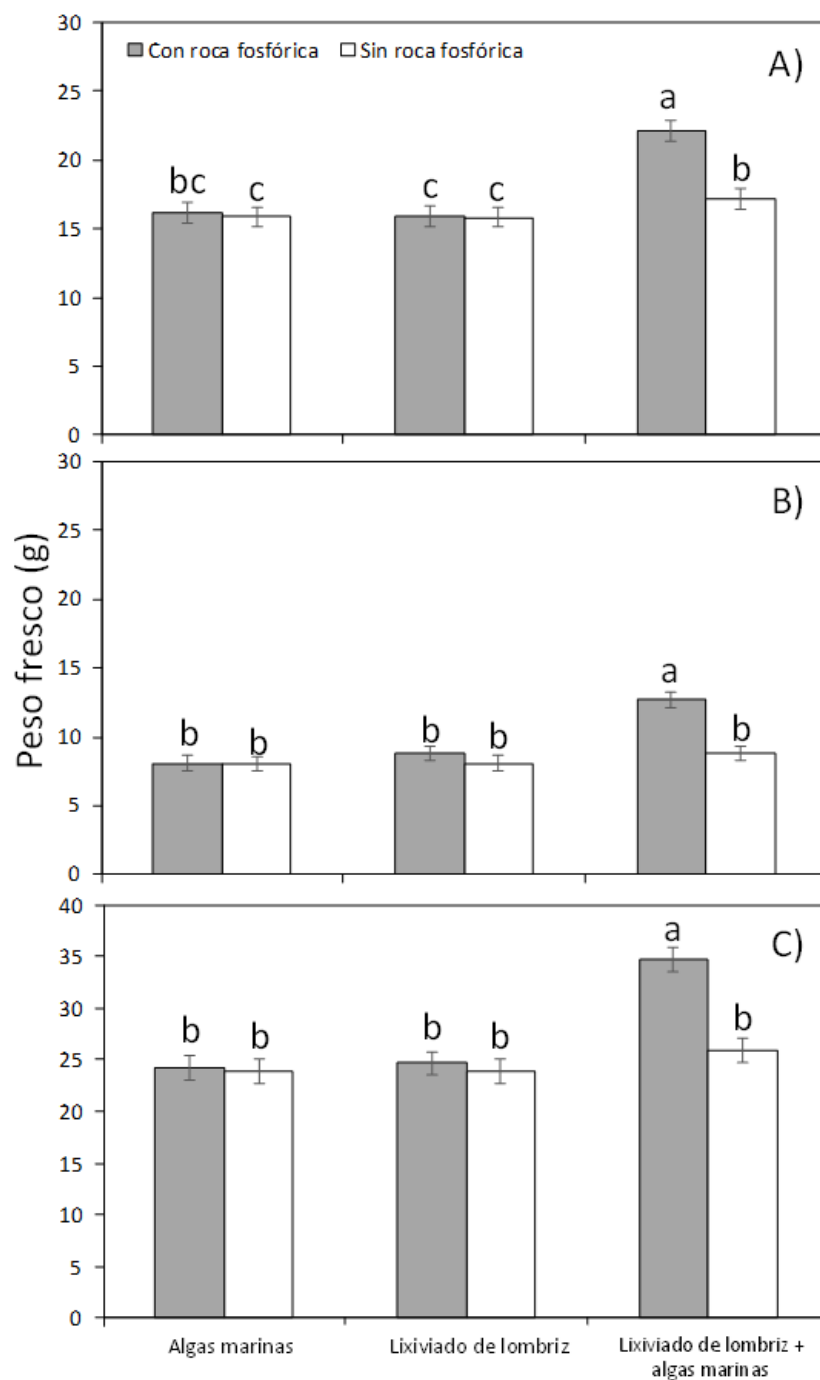


Figura 4. Interacción de la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de algas marinas, lixiviados de lombriz, y su combinación (AL × FF), sobre el peso fresco de las hojas (A), peso fresco del tallo (B) y peso fresco de la parte aérea (C), en el cultivo de albahaca.

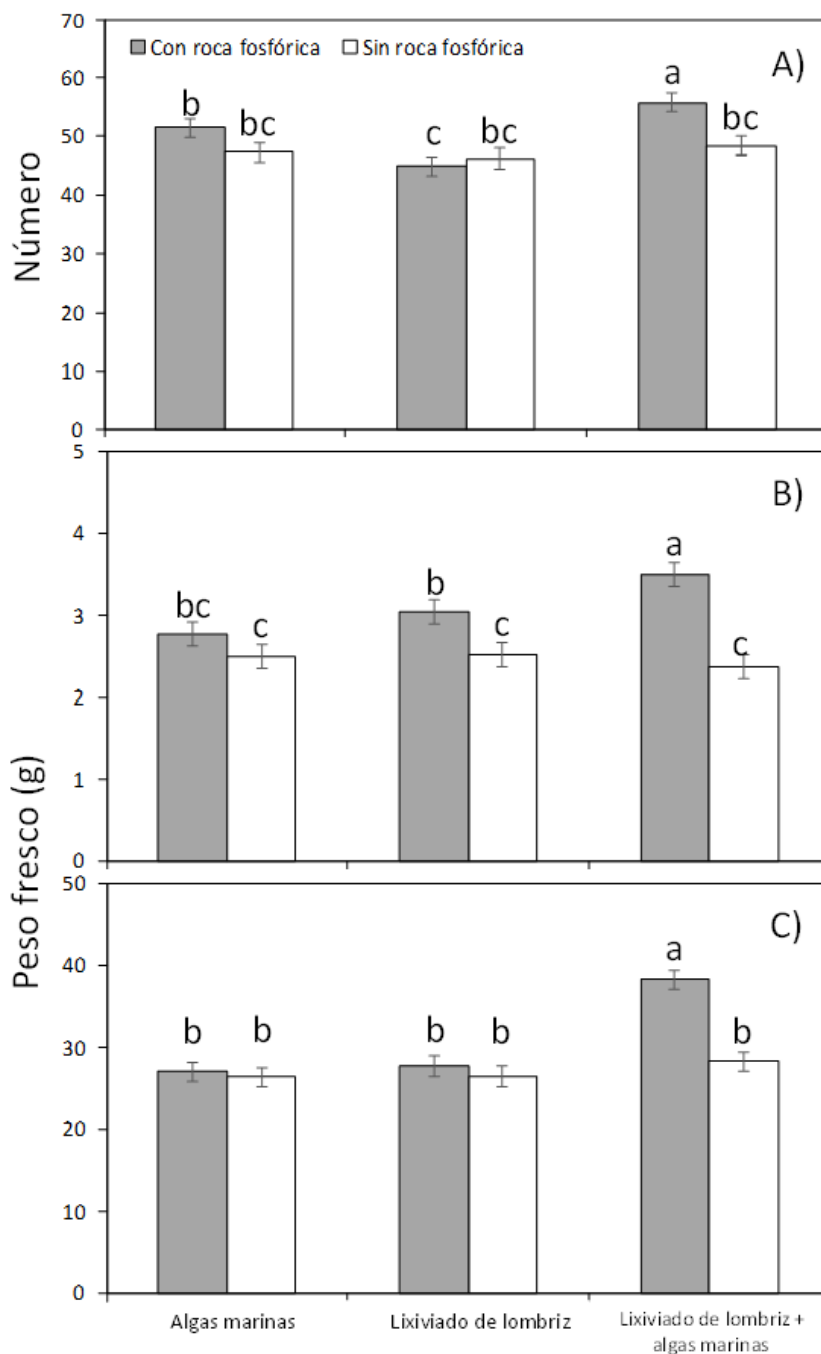


Figura 5. Interacción de la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de algas marinas, lixiviados de lombriz, y su combinación (AL × FF), sobre el número de hojas (A), peso fresco de raíz (B) y biomasa fresca total (C), en el cultivo de albahaca.

DISCUSIÓN

Concentración de NO_3^- , K^+ y SST en el extracto celular de pecíolo

En el presente estudio, la interacción entre la fertilización de fondo con roca fosfórica y la aplicación líquida de biofertilizantes no influyó significativamente en la concentración de NO_3^- , K^+ ni en los SST del extracto celular de pecíolo. De manera similar, la roca fosfórica no produjo diferencias en ninguno de estos nutrientes. En cambio, la aplicación líquida de los biofertilizantes sí modificó temporalmente la concentración de K^+ a los 15 ddt, respuesta que no se mantuvo en las evaluaciones posteriores. La ausencia de diferencias en NO_3^- y la respuesta transitoria del K^+ muestran que los tratamientos evaluados no produjeron cambios sostenidos en la concentración de estos iones durante las primeras etapas de crecimiento de la albahaca.

La ausencia de efecto de la fertilización de fondo sobre las concentraciones de NO_3^- ni K^+ pudo deberse a que la roca fosfórica constituye una fuente de P de baja solubilidad, por lo que no necesariamente se esperan cambios directos en la concentración de N o K en la planta. Además, su disolución depende de las características de la roca y de las condiciones del suelo, particularmente del pH, y de los procesos que ocurren en la rizosfera (García-Berumen *et al.* 2025). En el presente estudio, el pH ligeramente alcalino del suelo (7.6) pudo limitar la solubilización de la roca fosfórica durante las primeras etapas del cultivo, ya que su efectividad agronómica generalmente aumenta conforme se incrementa la acidez del suelo.

Por otro lado, la modificación transitoria en la concentración de K^+ a los 15 ddt, ocasionada por la aplicación por separado del extracto de algas marinas o lixiviado de lombriz en comparación con la aplicación conjunta, podría explicarse porque los extractos de algas pueden favorecer la absorción y utilización de K, aunque su respuesta depende de la composición del producto, la dosis y las condiciones de aplicación (Ali *et al.* 2021). Asimismo, los productos derivados del vermicompost contienen nutrientes solubles y otros componentes que pueden contribuir a la nutrición vegetal (González-Solano *et al.* 2013).

Los valores de SST permanecieron estables entre tratamientos evaluados, en el orden de los 1.12-2.08 °Brix. Lo anterior sugiere que los materiales carbonados metabolizados no se alteraron con los tratamientos evaluados durante el experimento. En albahaca, los SST suelen responder más claramente a condiciones de estrés y a cambios marcados en la nutrición nitrogenada, que a ajustes moderados en fertilización orgánica (Lam *et al.* 2025).

Estos resultados mostraron que, bajo el manejo orgánico, la respuesta inicial de NO_3^- , K^+ y SST no depende únicamente de la aplicación de insumos individuales, sino de las interacciones entre los distintos componentes que ocurren entre los distintos componentes del agroecosistema. En los sistemas de manejo orgánico de cultivos, las dinámicas de liberación de elementos minerales son complejas y los efectos de las enmiendas se expresan de manera progresiva y frecuentemente a través de variables fisiológicas y de crecimiento, más que mediante cambios inmediatos en concentraciones iónicas del tejido vegetal (Chandel *et al.* 2024, Al-Mansour y Kalaivanan 2021).

Índice de clorofila y temperatura foliar

El índice de clorofila presentó interacción significativa entre la fertilización de fondo y la aplicación líquida a los 13 y 27 ddt. Sin embargo, la respuesta cambió entre las fechas evaluadas. A los 13 ddt, la aplicación de roca fosfórica aumentó el índice de clorofila cuando se utilizó lixiviado de lombriz o la combinación de lixiviado + algas; a los 27 ddt ocurrió lo contrario, particularmente con el lixiviado de lombriz, cuyo mayor valor se obtuvo sin roca fosfórica. Esta variación podría indicar que el efecto de los biofertilizantes sobre el índice de clorofila dependió de la presencia de roca fosfórica y de la etapa de desarrollo del cultivo. Por tanto, las combinaciones evaluadas no mostraron una respuesta constante durante el crecimiento de la albahaca.

Fue hasta los 37 ddt cuando la fertilización de fondo con roca fosfórica, presentó un efecto independiente sobre el índice de clorofila. Posiblemente eso se debió a la baja solubilidad de dicha fuente de fósforo y a los procesos que determinan su disponibilidad en el suelo. Algunas investigaciones señalan, la disponibilidad de P está estrechamente relacionada con las transformaciones que ocurren en la rizosfera y con la actividad de los microorganismos del suelo (Barin *et al.* 2022). En albahaca, la importancia del P sobre el estado fisiológico también ha sido documentada; su deficiencia disminuyó el contenido de clorofilas *a* y *b* y afectó el crecimiento de las plantas (Song *et al.* 2024); sin embargo, esta relación debe interpretarse con cautela, ya que en el presente estudio no se determinó la concentración de P en el tejido vegetal.

La temperatura foliar presentó una respuesta dependiente de la combinación de los tratamientos en las tres fechas evaluadas. Durante los primeros 27 ddt, el lixiviado de lombriz registró mayor temperatura foliar cuando se combinó con roca fosfórica que cuando se aplicó sin esta fuente de P; posteriormente a los 37 ddt, la diferencia más evidente ocurrió con el extracto de algas marinas, pero con una respuesta inversa. La temperatura de la hoja se relaciona con el balance energético y puede variar con los cambios en la pérdida de calor por transpiración; pero, también se relaciona con la raíz, la cual se encarga de extraer el agua necesaria para mantener la temperatura de la planta.

Índice de vegetación normalizada y altura de la planta

La interacción significativa entre la fertilización de fondo y la aplicación líquida de biofertilizantes observada en el NDVI durante 27 y 37 ddt indicó que la respuesta del cultivo dependió de la combinación de ambos factores en estas etapas. A los 27 ddt, la roca fosfórica incrementó el NDVI cuando se aplicaron algas marinas o lixiviado de lombriz, mientras que con la aplicación conjunta de ambos biofertilizantes no se observaron diferencias entre plantas con y sin roca fosfórica. A los 37 ddt se mantuvo una respuesta favorable de la roca fosfórica cuando se aplicaron por separado algas marinas o lixiviado de lombriz; en cambio, la combinación de ambos biofertilizantes presentó los menores valores de NDVI, independientemente de la fertilización de fondo. Estas diferencias muestran que la respuesta espectral del cultivo no fue uniforme entre los tratamientos y cambió conforme avanzó el desarrollo de las plantas.

El NDVI integra información sobre biomasa, arquitectura del dosel y actividad fotosintética, por lo que su respuesta diferenciada refleja cambios funcionales en el crecimiento del cultivo (Mendoza-Pérez *et al.* 2024, Rouphael y Colla 2020). La mayor expresión del NDVI en tratamientos con roca fosfórica combinada con algas marinas o lixiviado de lombriz sugiere que el fósforo basal moduló

la eficacia de los biofertilizantes líquidos, favoreciendo el desarrollo del follaje y la cobertura vegetal durante etapas clave del crecimiento.

La fertilización de fondo presentó un efecto consistente sobre el NDVI al obtener los valores más altos durante el estudio. Aunque las diferencias se observaron desde los 3 ddt, no es posible atribuir esta respuesta temprana directamente a una mayor disponibilidad de P, debido a que esta variable no fue determinada durante el experimento. Conforme se incrementaron los valores de NDVI, se tuvieron los mayores valores de altura y biomasa. Este comportamiento coincide con reportes en hortalizas bajo manejo orgánico, donde la fertilización fosfatada natural promueve incrementos progresivos en biomasa y altura, más que respuestas inmediatas en concentración nutrimental (Amalina *et al.* 2022).

La altura de planta también respondió a los dos factores evaluados, aunque no presentó interacción entre ellos. Tal como se mencionó anteriormente, la roca fosfórica incrementó la altura en todas las fechas, mientras que las aplicaciones líquidas produjeron diferencias durante todo el periodo de evaluación. A los 37 ddt, el lixiviado de lombriz presentó los mayores valores y alcanzó 52.59 cm; asimismo, las algas marinas favorecieron el crecimiento de las plantas durante las primeras evaluaciones, mientras que la aplicación conjunta registró valores menores. La respuesta a la roca fosfórica concuerda con la importancia del P para el crecimiento de la albahaca, ya que su deficiencia puede limitar considerablemente el desarrollo de esta especie (Song *et al.* 2024). Por otra parte, los extractos de algas contienen diversos compuestos bioactivos y su aplicación se ha relacionado con incrementos en crecimiento y biomasa en diferentes cultivos (Ali *et al.* 2021).

Rendimiento y biomasa de la planta

Los componentes de biomasa mostraron una respuesta dependiente de la combinación entre la fertilización de fondo y la aplicación líquida de biofertilizantes, lo que indica una interacción significativa FF $\times$ AL para todas las variables evaluadas. En particular, la aplicación conjunta de lixiviado de lombriz y algas marinas produjo los mayores valores de peso fresco de hojas, tallo, parte aérea, raíz y biomasa fresca total cuando estuvo acompañada de roca fosfórica. En ausencia de la fertilización de fondo, la misma combinación no mantuvo esa respuesta, lo que indica que su efecto sobre la acumulación de biomasa estuvo condicionado por la presencia de roca fosfórica. En albahaca también se han observado respuestas favorables al uso combinado de insumos orgánicos; por ejemplo, Raj *et al.* (2022) obtuvieron mayor rendimiento de biomasa con la integración de vermicompost, biofertilizantes y extracto de algas marinas.

De manera independiente, la fertilización con roca fosfórica incrementó el número de hojas y el peso fresco de hojas, tallo, parte aérea y planta completa, mientras que el peso fresco de raíz no presentó diferencias significativas. Esta respuesta fue consistente con los mayores valores de NDVI y altura observados durante el crecimiento, y muestra que las diferencias registradas previamente se reflejaron finalmente en una mayor acumulación de biomasa aérea. En albahaca, la deficiencia de P puede reducir considerablemente el crecimiento y la acumulación de biomasa (Song *et al.* 2024). Sin embargo, debido a que no se determinó la concentración de P en los tejidos, la mayor biomasa observada con roca fosfórica no puede atribuirse directamente a una mayor absorción de este elemento.

Entre las aplicaciones líquidas de biofertilizantes, el lixiviado de lombriz presentó los mayores valores de peso fresco de hojas, parte aérea y planta completa, además de uno de los mayores números de hojas. Lo anterior indicaría que su aplicación individual favoreció la acumulación de biomasa de la albahaca bajo las condiciones del experimento. En esta especie, Raj *et al.* (2022) observaron incrementos en crecimiento y rendimiento de biomasa con el uso de vermicompost, mientras que el extracto de algas también mejoró diferentes variables de crecimiento y producción. Estos autores encontraron que la integración de vermicompost, biofertilizantes y extracto de algas produjo los mayores rendimientos de biomasa, lo cual coincide parcialmente con la respuesta observada en el presente estudio, donde el mejor comportamiento de la combinación lixiviado + algas dependió de la presencia de roca fosfórica.

CONCLUSIONES

La fertilización de fondo con roca fosfórica combinada con la aplicación líquida de lixiviado de lombriz y extracto de algas marinas mejoró el desempeño fisiológico, el crecimiento y el rendimiento de *O. basilicum* bajo manejo orgánico. Aunque las concentraciones de NO_3^- , K^+ y sólidos solubles no mostraron respuestas significativas, y el efecto sobre el K^+ fue únicamente transitorio, la integración de los insumos modificó variables fisiológicas, de crecimiento y de biomasa. Los resultados indican que el manejo nutrimental orgánico integrado tiene potencial para mejorar la producción de albahaca bajo las condiciones evaluadas.

DECLARACIÓN SOBRE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa (Grammarly y ChatGPT) con el objetivo de revisar y mejorar la redacción, la gramática y el estilo del texto en español e inglés, así como para ayudar en la búsqueda y organización de referencias bibliográficas. La revisión, verificación, edición e interpretación de todo el contenido aportado por las herramientas de IA fue realizada por los autores, quienes asumen la total responsabilidad por la integridad científica y el contenido final publicado. No se utilizó IA para el análisis de datos, la generación de resultados o la interpretación científica de los mismos.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia. La información complementaria, puede ser solicitada al autor por correspondencia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo a la Ingeniera en Agronomía Yailin Amairany Muñoz Hernández por el apoyo recibido en la colecta de datos; una parte de la información obtenida ha sido utilizada como documento de la tesis de licenciatura “Evaluación agronómica del cultivo de albahaca (*Ocimum Basilicum* L.) con sistema de producción orgánico bajo invernadero”.

LITERATURA CITADA

- Ali O, Ramsubhag A, Jayaraman J (2021) Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: implications towards sustainable crop production. *Plants* 10(3): 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Al-Mansour B, Kalaivanan D (2021) Soil microbial community dynamics as influenced by integrated nutrient management practices in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivation. *Journal of Horticultural Sciences* 16(1): 103-113. <https://doi.org/10.24154/jhs.v16i1.1125>
- Amalina F, Abd-Razak AS, Krishnan S, Sulaiman H, Zularisam AW, Nasrullah M (2022) Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications - A review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>
- Backiam ADS, Duraisamy S, Karuppayia P, Balakrishnan S, Sathyan A, Kumarasamy A, Raju A (2023) Analysis of the main bioactive compounds from *Ocimum basilicum* for their antimicrobial and antioxidant activity. *Biotechnology and Applied Biochemistry* 70(6): 2038-2051. <https://doi.org/10.1002/bab.2508>
- Barin M, Asadzadeh F, Hosseini M, Hammer EC, Vetukuri RR, Vahedi R (2022) Optimization of biofertilizer formulation for phosphorus solubilizing by *Pseudomonas fluorescens* Ur21 via response surface methodology. *Processes* 10(4): 650. <https://doi.org/10.3390/pr10040650>
- Chandel S, Desai BS, Jha SK, Sinha SK, Patel DP, Kumar N (2024) Role of organic and inorganic fertilizers in enhancing biomass yield and eugenol content of ornamental basil (*Ocimum gratissimum* L.). *Heliyon* 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30928>
- Chekwube EM, Erasmus M (2023) Vermicomposting technology - A perspective on vermicompost production technologies, limitations and prospects. *Journal of Environmental Management* 345(1): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118585>
- Dasgan HY, Aldiyab A, Elgudayem F, Ikiz B, Gruda NS (2022) Effect of biofertilizers on leaf yield, nitrate amount, mineral content and antioxidants of basil (*Ocimum basilicum* L.) in a floating culture. *Scientific Reports* 12: 20917. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24799-x>
- García-Berumen JA, Flores-de-la-Torre JA, de-los-Santos-Villalobos S, Espinoza-Canales A, Echeverría-Cháirez FG, Gutierrez-Bañuelos H (2025) Phosphorus dynamics and sustainable agriculture: The role of microbial solubilization and innovations in nutrient management. *Current Research in Microbial Sciences* 8100326. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100326>
- González-Solano KD, Rodríguez MM de las N, Trejo-Téllez LI, García CJL, Sánchez EJ (2013) Efluente y té de vermicompost en la producción de hortalizas de hoja en sistema NFT. *Interciencia* 38(12): 863-869.
- Jamwal S, Kumari A, Veeragurunathan V, Prasad K, Ghosh A, Kumar R (2025) Enhancing growth, yield, essential oil content, and composition of holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L.) using red algae-based bio-stimulant under acidic conditions of the Western Himalayas. *BMC Plant Biology* 25(1): 84. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06064-1>

- Johnson R, Joel JM, Puthur JT (2024) Biostimulants: The futuristic sustainable approach for alleviating crop productivity and abiotic stress tolerance. *Journal of Plant Growth Regulation* 43: 659-674. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11144-3>
- Lam VP, Bok G, Loi DN, Do MC, Park J (2025) Seaweed foliar biostimulants improve growth and phytochemicals of thai basil (*Ocimum basilicum* L.) in a plant factory. *Plants* 14(21): 3271. <https://doi.org/10.3390/plants14213271>
- Mendoza-Pérez C, Valle-Gough RE, Samaniego-Gámez BY, Ruelas-Islas J del R, Núñez-Ramírez F (2024) Relación entre lecturas NDVI y el crecimiento en tomatillo, repollo y chile habanero. *Invernus* 19(1). <https://doi.org/10.46588/invernus.v19i1.109>
- Núñez-Ramírez F, Contreras R, Robles-Contreras F, Macías-Duarte R, Escobosa-García MI, Santillano J (2017) Influencia de la fertirrigación nitrogenada en la concentración de nitratos en el extracto celular de peciolo, el rendimiento y la calidad de tomate de invernadero. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 49: 93-103.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA. (1954) Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture. Circular No. 939. US Government Printing Office, Washington DC. <https://dn720703.ca.archive.org/0/items/estimationofavai939olse/estimationofavai939olse.pdf>. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2026.
- Pham TH, Nguyen XT, Nguyen PN, Tran NCT, Thanh LQ, Nguyen VT, Nguyen THT (2022) Effect of three different organic fertilizers on growth, yield, and essential oil content of basil (*Ocimum basilicum* var. *Pilosum*). *The Journal of Agriculture and Development* 21(3): 21-27. <https://doi.org/10.52997/jad.3.03.2022>
- Raj Y, Ali N, Pati AM, Kumar R (2022). Cleaner production technologies for the amelioration of soil health, biomass and secondary metabolites in *Ocimum basilicum* L. under Indian Western Himalaya. *Frontiers in Plant Science* 13: 976295. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.976295>
- Rezaei-Chiyaneh E, Amani Machiani M, Javanmard A, Mahdavia H, Maggi F, Morshedloo MR (2021) Vermicompost application in different intercropping patterns improves the mineral nutrient uptake and essential oil compositions of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21(1): 450-466. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00373-0>
- Rouphael Y, Colla G (2020) Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science* 11: 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Said-Aljalaly AA, Said-Aljalaly SA, AL-Mentafji HNH (2021) Effect of phosphate rock and kinetin and its interactions in the growth of basil plant *Ocimum Basilicum* L. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 790(1): 012068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/790/1/012068>
- Sáez JA, Pérez-Murcia MD, Vico A, Martínez-Gallardo MR, Andreu-Rodríguez FJ, López MJ, Bustamante MA, Sanchez-Hernandez JC, Moreno J, Moral R (2021) Olive mill wastewater-evaporation ponds long term stored: Integrated assessment of in situ bioremediation strategies based on composting and vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials* 402: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123481>
- Sleighter RL, Hanson T, Holden D, Richards KM (2023) Abiotic stress mitigation: A case study from 21 trials using a natural organic matter based biostimulant across multiple geographies. *Agronomy* 13(3): 728. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030728>
- Song J, Yang J, Jeong BR (2024) Characterization of physiology, photosynthesis, and nutrition based on induced deficiencies of macro- and micronutrients in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agronomy* 14(1): 208. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010208>