

BIOFERMENTOS EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DE PLANTAS DE *Plukenetia volubilis* L. EN CONDICIONES DE VIVERO

BIOFERMENTS FOR THE GROWTH AND QUALITY OF *Plukenetia volubilis* L. PLANTS UNDER NURSERY CONDITIONS

Percy Díaz-Chuquizuta^{1a*}, Ayda Karín Valles-Ramírez², Henry Díaz-Chuquizuta³, Roxana Callante-Mendoza^{1b} y César Porfirio Díaz-Chuquizuta⁴

^{1a} Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Estación Experimental Agraria Andenes. Av. Micaela Bastidas N°314, Cusco, C.P. 08002, Cusco, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9893-5482>

^{1b} Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Estación Experimental Agraria Andenes. Av. Micaela Bastidas N°314, Cusco, C.P. 08002, Cusco, Perú
<https://orcid.org/0009-0005-5629-2182>

² Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Estación Experimental Agraria El Porvenir. Carretera Fernando Belaunde Terry Km 14.5, San Martín C.P. 22200, Juan Guerra, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-1496-5279>

³ Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios. Estación Experimental Agraria San Ramón. Carretera Yurimaguas – San Ramón km 6, Loreto C.P. 16501, Alto Amazonas, Perú
<https://orcid.org/0009-0009-3908-9384>

⁴ Grupo VIRU S.A. Investigación y desarrollo Agro. Carretera Yurimaguas km 69, San Martín C.P. 22350, Bonilla, Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9573-8419>

* Autor para correspondencia: pdiazch@inia.gob.pe

RESUMEN

La obtención de plantas vigorosas de *Plukenetia volubilis* L. en vivero es fundamental para su establecimiento en campo. El objetivo fue evaluar el efecto de un biofermento comercial y uno artesanal, aplicado solo y complementado con extracto de *Azadirachta indica* sobre el crecimiento, la distribución de biomasa y la calidad morfoestructural de *P. volubilis* L. en vivero. Se utilizó un diseño completamente al azar, distribuido en cuatro tratamientos: testigo, biofermento comercial (EM), biofermento artesanal (ML) y biofermento artesanal complementado con extracto de *A. indica* (ML+N), con cinco repeticiones de 20 plantas. Los tratamientos se aplicaron directamente al sustrato de cada planta a los 15 y 30 días después de la siembra, y las respuestas de las plantas se evaluaron durante 45 días. Se evaluaron variables morfológicas, biomasa seca e índices de calidad. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza, prueba de Tukey, correlación de Pearson y análisis multivariados. Los tres biofermentos registraron efectos beneficiosos respecto al testigo, con incrementos de 18-23% en el diámetro de tallo y 40-45% en la longitud radical. Asimismo, la biomasa seca total aumentó de 2,65 g a 3,80-3,91 g y el índice de calidad de Dickson aumentó de 0,11 a 0,21-0,22. ML incrementó el número de raíces y el área foliar y mostró un desempeño comparable

a EM, mientras que la adición de *A. indica* no proporcionó ventajas adicionales. Los biofermentos favorecieron la producción de plantas de *P. volubilis* más robustas y con una distribución de biomasa más equilibrada en condiciones de vivero.

Palabras clave. arquitectura radical, biomasa seca, consorcios microbianos, extracto botánico, índice de Dickson, inoculación al sustrato.

ABSTRACT

The production of vigorous *Plukenetia volubilis* L. plants in the nursery is crucial for successful establishment in the field. The objective was to evaluate the effects of a commercial and an artisanal biofertilizer, applied alone and supplemented with *Azadirachta indica* extract, on the growth, biomass distribution, and morphostructural quality of *P. volubilis* L. under nursery conditions. A completely randomized design was used. Four treatments were evaluated: a control, a commercial bioferment (EM), an artisanal bioferment (ML), and an artisanal bioferment supplemented with *A. indica* extract (ML+N), with five replicates of 20 plants each. Treatments were applied directly to the substrate of each plant 15 and 30 days after sowing, and plant responses were evaluated over a 45-day period. Morphological variables, dry biomass, and quality indices were assessed. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), Tukey's test, Pearson's correlation analysis, and multivariate analysis. All three bioferments showed beneficial effects compared to the control, with increases of 18–23% in stem diameter and 40–45% in root length. Likewise, total dry biomass increased from 2.65 g to 3.80–3.91 g, while the Dickson quality index increased from 0.11 to 0.21–0.22. ML application increased the number of roots and leaf area and showed a performance comparable to that of the EM treatment, whereas the addition of *A. indica* provided no additional benefits. Overall, the bioferments promoted the production of more robust *P. volubilis* plants with a more balanced biomass distribution under nursery conditions.

Keywords: radical architecture, dry biomass, microbial consortia, botanical extract, Dickson index, substrate inoculation.

INTRODUCCIÓN

El sachá inchi (*P. volubilis* L.) es un cultivo oleaginoso de la familia Euphorbiaceae originario de la Amazonia sudamericana que ha despertado creciente interés mundial para las industrias alimentaria, nutracéutica y cosmética, debido a las elevadas concentraciones de ácidos grasos poliinsaturados, principalmente omega-3 y omega-6, proteínas de alta calidad y compuestos antioxidantes en sus semillas (Wang et al., 2018; Goyal et al., 2022). Se estima que se cultiva en 20 países de América Latina y Asia y que Perú tiene una producción de 1200 t de semilla anual (Kodahl y Sørensen, 2021). Su producción se realiza principalmente bajo esquemas de agricultura familiar y sostenible en sistemas amazónicos, por lo que se constituye como una especie estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola sostenible en regiones tropicales (Rodzi et al., 2022).

Este cultivo puede establecerse mediante siembra directa o mediante plantas producidas en vivero y luego trasplantadas al campo definitivo, lo que permite disponer de material vegetal uniforme y con adecuado desarrollo morfológico y radical optimizando el uso de semilla (Supriyanto et al., 2022). En la fase de vivero, el

sustrato constituye el medio físico, químico y biológico donde se desarrolla el sistema radical, por lo que su funcionalidad está condicionada por el equilibrio entre los materiales y mezclas utilizados, que permitan la disponibilidad de agua y minerales, la aireación y el desarrollo del sistema radical (Gohardoust et al., 2020). Al ser elaborados con suelo agrícola y componentes orgánicos locales, su composición puede ser variable y presentar limitaciones nutricionales o biológicas; por ello, su aptitud debe evaluarse para mejorar la interacción sustrato-microorganismo-planta (Pascual et al., 2018).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento pueden favorecer la solubilización de nutrientes, la producción de fitohormonas y el desarrollo radical (Backer et al., 2018; Gouda et al., 2018). Asimismo, los consorcios microbianos pueden contribuir a mayor disponibilidad y eficiencia en el uso de los nutrientes, con efectos sobre la distribución de biomasa y calidad morfoestructural de las plantas (Song et al., 2025; Panchal et al., 2025). Estas interacciones pueden modificar la arquitectura radical y robustecer la estructura de las plantas, atributos estrechamente relacionados con la capacidad de establecimiento post-trasplante y con índices integradores de su calidad como el de Dickson (Gifford et al., 2024;

Araujo et al., 2025).

En *Sesbania cannabina*, los microorganismos eficientes (EM) constituidos por bacterias fotosintéticas y ácidos-lácticas, levaduras, actinomicetos y hongos fermentadores, combinados con biochar incrementaron la absorción de nutrientes, la biomasa microbiana y el crecimiento vegetal (Cui et al., 2021). En trigo, la mezcla comercial de microorganismos promotores del crecimiento vegetal aplicada con biochar produjo incrementos de rendimiento dependientes del cultivar y del ambiente, aunque estos efectos no fueron evaluados en vivero (Caldara et al., 2024), mientras que en plantas jóvenes de *P. volubilis* L., los hongos micorrízicos arbusculares nativos *Nanoglomus plukenetiae* y *N. sacharum* promovieron el crecimiento mejorando los atributos morfológicos, la tolerancia a estrés y redujeron la infección por *Meloidogyne incognita* (Corazon-Guivin et al., 2024). Asimismo, en frijol común durante el crecimiento vegetativo, formulaciones microbianas estandarizadas “microorganismos eficientes” regularon procesos fotosintéticos y la concentración endógena de fitohormonas (Talaat, 2019). Por otra parte, los extractos de *A. indica* contienen compuestos con capacidad para intervenir en los procesos de transformación del nitrógeno, particularmente mediante la inhibición de la nitrificación, lo que puede modificar temporalmente la disponibilidad de amonio y nitrato en el medio de crecimiento (Sriraj et al., 2022; Abeka et al., 2022). Debido a que el nitrógeno interviene en el crecimiento inicial y la acumulación de biomasa, en el presente estudio se incorporó extracto de *A. indica* al biofermento artesanal como tratamiento exploratorio, con la finalidad de determinar si su adición genera una respuesta morfoestructural diferente respecto al biofermento artesanal aplicado solo.

A pesar de los avances, continúa siendo limitada la evidencia sobre el efecto de biofermentos comerciales estandarizados y artesanales en la producción de plantas de *P. volubilis* L. en condiciones de vivero, así como la respuesta generada por la incorporación de extracto de *A. indica* en un biofermento artesanal. En este contexto, el objetivo fue evaluar el efecto de un biofermento comercial y de un biofermento artesanal, aplicado solo y complementado con extracto de *A. indica*, sobre el crecimiento, la distribución de biomasa y la calidad morfoestructural de *P. volubilis* L. en vivero. Se planteó la hipótesis de que los biofermentos favorecerían el desarrollo radical, la acumulación equilibrada de la biomasa y calidad morfoestructural de las plantas, mientras que la incorporación de extracto de *A. indica*, por su posible influencia sobre las transformaciones del

nitrógeno, produciría una respuesta diferenciada respecto al biofermento artesanal aplicado solo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El experimento se realizó en el vivero de producción de plantas de *P. volubilis* L. de la Estación Experimental Agraria El Provenir (EEA), ubicado en el distrito de Juan Guerra, San Martín, Perú, a 239 m.s.n.m. (76°18'44,9''O; 06°35'27,7''S; Fig. 1). Está dentro de la zona de vida denominada Bosque Seco Tropical (Aybar-Camacho et al., 2017). Durante el periodo experimental de los meses de agosto a noviembre del 2022, en el interior del vivero se registró una temperatura promedio de 32 °C y una humedad relativa de 50,7%.

Preparación de inoculantes

La preparación de los biofermentos se realizó siguiendo la metodología descrita por Díaz-Chuquizuta et al. (2025) y Restrepo y Agredo (2020). Para la obtención del biofermento artesanal (ML) se muestreó un bosque secundario con más de 10 años de sucesión secundaria. Se retiró la capa superficial de hojarasca seca hasta localizar material en descomposición con presencia visible de hifas fúngicas de color blanco cremoso, anaranjado y marrón. Se colectaron aproximadamente 5 kg de ese material, seguidamente fue trasladado al vivero donde se eliminaron restos de hojas verdes, insectos muertos y fragmentos de ramas frescas.

Posteriormente, se disolvieron 0,5 kg de melaza en 5 L de agua. El material recolectado se mezcló con 10 kg de polvillo de arroz, incorporando de manera gradual la melaza diluida. La humedad de la mezcla se verificó manualmente con la técnica del “puño” (Restrepo y Agredo, 2020), comprimiendo una porción con la mano hasta obtener una consistencia que permita su compactación momentánea y su fácil desmoronamiento. La mezcla se colocó gradualmente en un recipiente de 20 L con tapa hermética, compactándola para minimizar la presencia de oxígeno y favorecer la fermentación anaerobia que favoreció la eliminación de posibles microorganismos dañinos. El recipiente se mantuvo cerrado durante 15 días.

Transcurrido ese periodo, se extrajeron 0,5 kg del fermento sólido y se colocaron en una bolsa de tela de algodón esterilizada, a continuación, se sumergió en 10 L de agua sin cloro. El material se exprimió manualmente para recuperar el inóculo líquido. El extracto resultante se transfirió a un envase de 20 L con tapa hermética, al que se añadió 1 kg de melaza. La mezcla se homogeneizó con

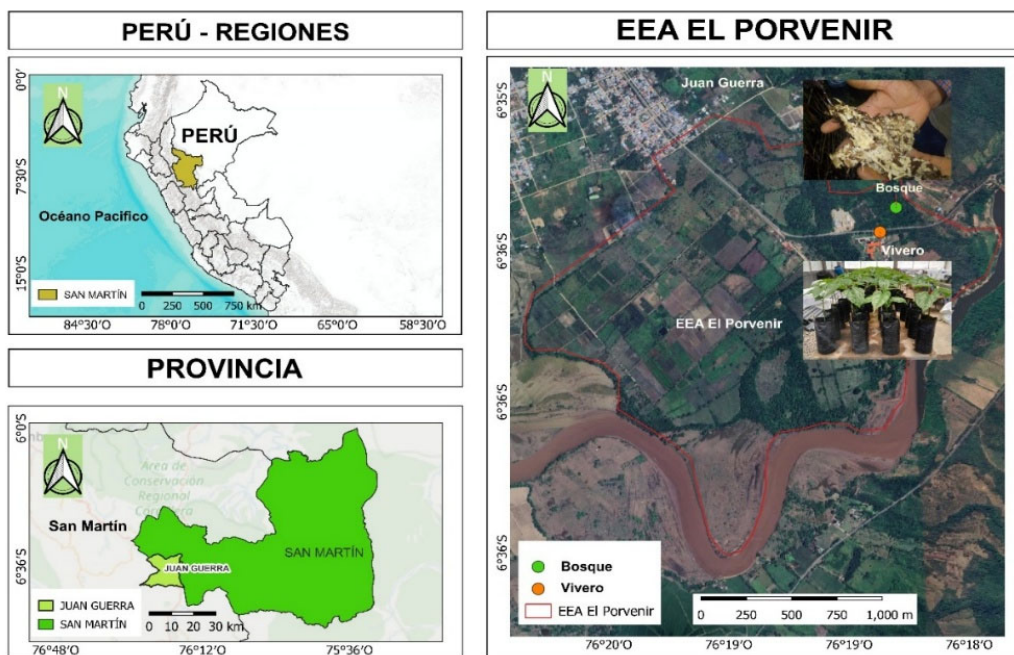


Fig. 1. Ubicación del experimento realizado en el vivero y del sitio de colecta de muestras microbianas en bosque, EEA El Porvenir, San Martín, Perú.

Fig. 1. Location of the nursery experiment and the microbial sampling site in the forest at EEA El Porvenir, San Martín, Peru

un agitador de madera y se completó con agua, dejando un espacio aproximado de 15 cm entre la superficie del líquido y la tapa. Finalmente, el recipiente se cerró y se dejó fermentar durante 15 días adicionales.

El biofermento comercial contenía microorganismos eficientes (EM) estandarizados (BIOEM®), con *Lactobacillus casei* $1,3 \times 10^7$ UFC mL⁻¹ y *Saccharomyces cerevisiae* $2,4 \times 10^5$ UFC mL⁻¹. La activación se realizó de acuerdo con las indicaciones del producto, se disolvió 1 L del concentrado en 20 L de agua sin cloro más 1 kg de melaza. Posteriormente la solución se dejó fermentar por 15 días.

Una vez finalizado el proceso de fermentación de cada una de las soluciones de biofermentos se extrajo una muestra líquida de 0,5 L de cada solución para su caracterización microbiológica en el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso", La Molina, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Asimismo, se tomó otra muestra de 0,5 L de cada preparado para su análisis químico en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA El Porvenir (Tabla 2).

Preparación del extracto del *A. indica*

Se recolectaron foliolos del tercio apical de la hoja, del árbol establecidos en la EEA El Porvenir.

El material se trasladó al laboratorio y se secó al ambiente durante 24 h. Posterior a ello, se pesaron 100 g de hojas y se trituraron con 225 mL de agua destilada en una licuadora, obteniendo 210 mL de extracto que se colocaron en un envase de vidrio esterilizado y mantenido en refrigeración para ser usado en cada aplicación. Para su aplicación se mezcló de acuerdo con el tratamiento establecido en el diseño experimental. Este fue usado como enmienda líquida.

Preparación del sustrato

El sustrato consistió en suelo agrícola de los primeros 20 cm superficiales, estiércol vacuno y arena de río. Cada componente se tamizó por separado y enseguida se mezcló en proporción 2:1:0,5. La mezcla se colocó en bolsas de polipropileno transparente de 20,3 cm de ancho x 30,5 cm de altura x 0,025 mm de espesor (8" x 12", calibre 1) de capacidad de 1,5 kg y llevados a esterilización en autoclave vertical automatizada digital de 80 L modelo Avda-80D (BioGenicsLab) a 120 °C y 1,2 bares de presión por 60 min, con el propósito de asegurar la inocuidad del sustrato.

El sustrato esterilizado, se transfirió a bolsas negras de polietileno de 1 kg de capacidad, de 12,8 cm de ancho por 25,5 cm de altura y 0,051 mm de espesor (6" x 9", calibre 2). Antes del llenado de las bolsas se tomó una muestra compuesta del sustrato

Tabla 1. Grupos microbianos identificados en las muestras de ML y EM.**Table 1. Microbial groups identified in the ML and EM samples.**

Grupos microbiológicos	Unidad	ML	EM
Coliformes fecales	NMP mL ⁻¹	<3	<3
<i>Escherichia coli</i>	NMP mL ⁻¹	<3	<3
<i>Pseudomonas</i> sp	NMP mL ⁻¹	<3	<3
Población de aeróbicos	UFC mL ⁻¹	1,61 × 10 ¹⁰	1,11 × 10 ⁹
Bacterias de vida libre fijadoras de N	NMP mL ⁻¹	24 × 10 ³	5 × 10 ²
Hongos micorrícicos arbusculares	Esporas 100 mL ⁻¹	20	0
Bacterias solubilizadoras de fosfato	UFC mL ⁻¹	12 × 10	11 × 10
Ácido indolacético	mg mL ⁻¹	4,70	2,30

NMP: Número más probable, UFC: Unidades formadoras de colonias. ML: Biofermento artesanal; EM: Biofermento comercial.

Tabla 2. Caracterización química de cada solución microbiana.**Table 2. Chemical characterization of each microbial solution.**

Resultados	Unidad	ML	EM
pH	-	3,63	3,56
C.E	mS m ⁻¹	0,01	0,01
N	mg L ⁻¹	500	500
P	mg L ⁻¹	100	0
K	mg L ⁻¹	700	1000
Ca	mg L ⁻¹	200	300
Mg	mg L ⁻¹	100	100
M.O.	%	1,18	1,33

pH: Concentración de hidrógeno, C.E: Conductividad eléctrica, N: Nitrógeno, P: Fósforo, M.O: Materia orgánica, N: Nitrógeno, P: Fósforo, K: Potasio, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, ML: Biofermento artesanal, EM: Biofermento comercial

para su análisis físico y químico en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Foliareos de la EEA El Porvenir. El sustrato presentó textura franco arenoso, pH de 7,96, conductividad eléctrica de 0,18 mS cm⁻¹, 2,02% de materia orgánica, 0,10% de nitrógeno total, contenido de fósforo disponible de 6,36 mg kg⁻¹, contenido de potasio disponible de 201,02 mg kg⁻¹ y contenido de calcio de 10,33 cmolc kg⁻¹ y magnesio de 1,96 cmolc kg⁻¹. Estos resultados se utilizaron únicamente para describir las condiciones iniciales del sustrato y no para establecer categorías de fertilidad.

Colecta de semillas

Se colectaron frutos secos de *P. volubilis* L. del ecotipo Mishquiyacu ubicados en el Centro Poblado de Bello Horizonte, San Martín, Perú. Los frutos fueron trasladados al secadero de la EEA El Porvenir, donde permanecieron en secado al ambiente (máx. de 32 °C y mín de 22 °C), durante siete días. Luego se procedió al descapsulado de las semillas y selección con base en criterios de uniformidad de tamaño y sanidad.

Manejo del experimento

Las semillas se lavaron y desinfectaron mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 1% durante cinco min; posteriormente lavadas con agua destilada. Luego se colocaron en bandejas con arena de río esterilizada, hasta la emisión de la radícula. Una vez germinadas, las semillas se trasladaron a las bolsas almacigueras con el sustrato esterilizado, para continuar su crecimiento. Durante los 45 días que estuvieron en el vivero no se presentó ningún ataque de plagas o enfermedades.

Diseño experimental

Se utilizó el diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones, en un total de 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo conformada por un grupo de 20 plantas de *P. volubilis* L. con un total de 400 plantas. Los tratamientos fueron: T0, testigo sin enmienda orgánica; T1, EM (5 mL); T2, ML (5 mL); y T3, ML+N (5 mL de ML + 1 mL de extracto de *A. indica*). En todos los casos, la dosis de aplicación

fue de 100 mL por planta ajustando el volumen final con agua destilada. Los tratamientos se aplicaron directamente en el sustrato en dos aplicaciones, la primera a los 15 días después de la siembra y la segunda a los 15 días después de la primera, correspondiendo al protocolo operativo establecido antes de iniciar el experimento. En el tratamiento testigo se aplicó 100 mL de agua destilada por planta en el mismo tiempo.

Parámetros morfoestructurales y de calidad evaluados

Cada 15 días en 10 plantas seleccionadas al azar por unidad experimental se evaluó: la altura de planta (AP), se determinó desde la superficie del sustrato hasta el ápice, con un flexómetro de 1 mm de precisión (Truper Expert FIN-5M®); el diámetro del tallo (DT) se midió dos centímetros por debajo de inserción de los cotiledones con un vernier digital de 0,05 mm precisión (Truper – 14388). A partir de estas mediciones se calculó el incremento diario en altura (IA) y en diámetro (ID), de acuerdo con Díaz-Chuquizuta y Valdés-Rodríguez (2020), mediante la expresión $(tf - ti)/n$, donde “tf” es la medida final de la altura o diámetro a los 45 días después de la siembra, “ti” la medida inicial antes de la primera evaluación y “n” el tiempo que duró la evaluación (45 días).

El área foliar (AF) se estimó mediante la aplicación móvil “Petiole Pro” en el par de hojas de la parte media antes de la emisión del tallo guía. Mediante muestreo destructivo se evaluó la longitud (LR) y diámetro (DR) de la raíz principal, medidos con flexómetro y vernier respectivamente. Se realizó el conteo directo del número de raíces

(N°R), después de lavar cuidadosamente el sistema radical retirando los sobrantes del sustrato adherido.

Se calculó: el índice de esbeltez (IE) obtenido como la relación entre altura de planta y diámetro de tallo ($IE = AP/DT$), la relación altura de planta y longitud de raíz (AP/LR), la relación biomasa seca aérea y biomasa seca radical (BSA/BSR). Las plantas fueron secadas en estufa BE300 (Memmert®) a 70 °C por 72 h, para obtener la biomasa seca total (BST), posteriormente, la biomasa se separó en sus componentes para calcular la relación. Finalmente, se obtuvo el índice de calidad de Dickson (ICD), según la fórmula descrita por Díaz-Chuquizuta y Valdés-Rodríguez (2020).

Índice de calidad de Dickson (ICD) =

$$\frac{\text{Biomasa seca total (g)}}{\frac{\text{Altura de planta (cm)}}{\text{Diámetro de planta (cm)}} + \frac{\text{Biomasa seca aerea (g)}}{\text{Biomasa seca radicular (g)}}}$$

Muestreo de sustrato después del experimento

Con el propósito de describir las condiciones químicas finales del sustrato y aportar información complementaria para interpretar las respuestas morfoestructurales dentro de la interacción sustrato–microorganismos–planta, se obtuvo una muestra compuesta por tratamiento. Las muestras se enviaron al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares de la EEA El Porvenir. Debido a que se analizó una sola muestra compuesta por tratamiento, los resultados se consideraron descriptivos y no fueron sometidos a análisis estadístico ni clasificados mediante categoría de fertilidad (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización química descriptiva de cada sustrato al finalizar la evaluación de las plantas de *P. volubilis* L. en vivero.

Table 3. Descriptive chemical characterization of each substrate at the end of the evaluation period for *P. volubilis* L. plants under nursery conditions.

Resultados	Unidad	T0	T1	T2	T3
pH	Unid. H	7,67	7,65	7,80	7,73
C.E	mS cm ⁻¹	0,19	0,21	0,22	0,26
N	%	0,10	0,12	0,11	0,15
P	mg kg ⁻¹	6,40	8,60	8,40	10,32
K	mg kg ⁻¹	201,02	210,36	212,56	236,65
Ca	cmolc kg ⁻¹	10,32	11,36	12,56	14,23
Mg	cmolc kg ⁻¹	1,96	1,96	2,13	2,56
M.O.	%	2,01	2,31	2,23	2,96
CIC	cmolc kg ⁻¹	13	14	15	18
Textura		FA	FA	FA	FA

pH: potencial de hidrogeno, C.E: conductividad eléctrica, N: nitrógeno, P: fósforo, M.O: K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, M.O: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, FA: franco arenoso, T0: Testigo, T1: EM, T2: ML, T3: ML+N.

Análisis estadístico

Se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, los datos se sometieron a análisis de varianza y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$). La asociación lineal entre las variables morfológicas y los índices de calidad se examinó mediante correlaciones de Pearson. Complementariamente, se ajustaron modelos de regresión cuadrática entre el ICD y las variables de calidad. Adicionalmente, con el propósito de evaluar de manera integral el desempeño morfoestructural de las plantas y determinar qué variables explicaron la diferenciación entre tratamientos, se realizaron análisis multivariados complementarios. El análisis de componentes principales permitió resumir la variación conjunta de las variables, mientras que el análisis discriminante canónico se utilizó como evidencia descriptiva complementaria para representar la separación entre tratamientos, siendo este último como evidencia descriptiva complementaria. La base de datos se organizó en Excel y el procesamiento estadístico se realizó con software

Infostat y RStudio v. 4.3.1, utilizando la librería Agricolae (de Mendiburu, 2023).

RESULTADOS

Efecto de tratamientos en las características morfológicas e índices de calidad

El análisis de varianza (Tabla 4), detectó efecto significativo de los tratamientos en todas las variables evaluadas ($p < 0,05$).

Las plantas de *P. volubilis* L., tratadas con biofermentos presentaron un crecimiento morfoestructural más equilibrado respecto al testigo, caracterizado por mayor robustez, desarrollo radical, acumulación de biomasa e índices de calidad, aunque el testigo presentó los valores más altos en las variables de crecimiento longitudinal (Tabla 5). En comparación con el testigo, los tratamientos con biofermentos EM, ML y ML+N incrementaron el diámetro del tallo entre 18–23% y la longitud radical entre 40–45%. El tratamiento ML fue superior 27,90% en número de raíces y en 28,97% en área foliar respecto al testigo, mientras el tratamiento ML+N mostró el mayor valor promedio en longitud de raíces, siendo 30,90% más largo que el tratamiento

Tabla 4. Prueba de normalidad, homocedasticidad y análisis de varianza de las variables morfológicas y de calidad en plantas de *P. volubilis* L.

Table 4. Normality, homoscedasticity, and analysis of variance for morphological and quality variables in *P. volubilis* L. plants.

Variables	Trat (p-valor)	CMe	CV (%)	SW (p-valor)	Levene (p-valor)
DT (mm)	<0,0001**	0,01	1,74	0,6501 ns	0,3189 ns
AP (cm)	0,0001**	15,50	4,61	0,9925 ns	0,9197 ns
IAP (cm)	0,0001**	0,01	6,29	0,6527 ns	0,9589 ns
IDT (mm)	0,0235*	0,000015	25,66	0,311 ns	0,6452 ns
N°R	0,0001**	1,30	7,88	0,7352 ns	0,3502 ns
LR (cm)	<0,0001**	0,23	1,86	0,7059 ns	0,2181 ns
AF (cm ²)	<0,0001**	111,14	7,53	0,8317 ns	0,1196 ns
BSTa (g)	<0,0001**	0,0042	5,32	0,4553 ns	0,5748 ns
BSH (g)	<0,0001**	0,0037	3,85	0,9562 ns	0,2631 ns
BSR (g)	<0,0001**	0,001	4,07	0,0682 ns	0,9053 ns
BST (g)	<0,0001**	0,01	2,48	0,8852 ns	0,9193 ns
AP/LR	0,0043**	0,02	4,24	0,7322 ns	0,2821 ns
IE	<0,0001**	0,43	4,11	0,303 ns	0,8490 ns
BSA/BSR	<0,0001**	0,04	5,39	0,1518 ns	0,7516 ns
ICD	<0,0001**	0,00005	3,77	0,9658 ns	0,1078 ns

SW: Prueba de Shapiro Wilks, Lev: Levene, CMe: Cuadrado medio del error, CV: Coeficiente de variabilidad, T: Tratamiento, DT: Diámetro de planta, AP: Altura de planta, IDT: Incremento de diámetro del tallo, IAP: Incremento de altura de planta, N°R: Número de raíces, LR: Longitud de raíz, AF: Área foliar, BSTa: Biomasa seca de tallo, BSH: Biomasa seca de hoja, BSR: Biomasa seca radical, BST: Biomasa seca total, IE: Índice de esbeltez, AP/LR: Relación altura de planta – Longitud radical, BSA/BSR: Relación biomasa seca aérea – biomasa seca radical, ICD: Índice de calidad de Dickson, *: Significancia menor al 0,05, **: significancia menor al 0,01, ns: No significativo

Tabla 5. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($p < 0,05$) para variables morfológicas, biomasa seca e índices de calidad en plantas de *P. volubilis* L. en vivero.**Table 5. Tukey's multiple range test ($p < 0,05$) for morphological variables, dry biomass, and quality indices in *P. volubilis* L. plants under nursery conditions.**

Variables	EM	ML+N	ML	Testigo
Morfológicas				
DT (mm)	5,74 a	5,66 a	5,64 a	4,65 b
AP (cm)	85,67 b	82,01 b	79,47 b	94,46 a
IAP (cm dia ⁻¹)	1,52 b	1,45 b	1,40 b	1,77 a
IDT (mm dia ⁻¹)	0,02 ab	0,02 a	0,02 a	0,01 b
N°R	15,10 a	15,24 a	16,02 a	11,55 b
LR (cm)	27,75 a	28,27 a	28,12 a	19,43 b
AF (cm ²)	145,59 a	152,03 a	153,41 a	108,96 b
Biomasa seca				
BSTa (g)	1,31 a	1,30 a	1,26 a	0,98 b
BSH (g)	1,76 a	1,70 a	1,71 a	1,17 b
BSR (g)	0,83 a	0,86 a	0,83 a	0,50 b
BST (g)	3,91 a	3,86 a	3,80 a	2,65 b
Índices de calidad				
AP/LR	3,10 b	2,91 b	2,84 b	4,91 a
IE	14,94 b	14,51 b	14,10 b	20,37 a
BSA/BSR	3,76 b	3,65 b	3,53 b	4,42 a
ICD	0,21 a	0,22 a	0,21 a	0,11 b

EM: Biofermento comercial; ML: Biofermento artesanal; ML+N: Biofermento artesanal + extracto de neem; DT: diámetro del tallo; AP: altura de planta; IAP: incremento de altura de planta; IDT: incremento del diámetro del tallo; N°R: número de raíces; LR: longitud radical; AF: área foliar; BSTa: biomasa seca de tallo; BSH: biomasa seca de hojas; BSR: biomasa seca radical; BST: biomasa seca total; IE: índice de esbeltez; AP/LR: relación altura de planta/longitud radical; BSA/BSR: relación biomasa aérea/biomasa radical; ICD: índice de calidad de Dickson. Medias con una letra común en la fila no difieren significativamente según Tukey ($p > 0,05$).

testigo. En contraste, redujeron la altura de la planta entre 9,3 y 15,9% y el incremento diario de altura entre 14,1 y 20,9%. Asimismo, los valores de AP/LR, IE y BSA/BSR disminuyeron entre 36,9 – 42,2%, 26,7 – 30,8% y 14,9 – 20,1%, respectivamente. Esto indica que el mayor crecimiento en altura observado en el testigo estuvo acompañado de tallos más delgados, menor desarrollo radical y mayor proporción de biomasa hacia la parte aérea; mientras que los biofermentos favorecieron plantas menos elongadas, con mayor robustez y balance más equilibrado entre biomasa aérea y radical.

La capacidad de producir biomasa de las plantas de *P. volubilis* L., fue diferente entre los tratamientos, siendomás evidentes las diferencias de medias entre los biofermentos aplicados frente al testigo. Entre los biofermentos, no se detectaron diferencias notables, el tratamiento EM sobresalió en las fracciones biomasa seca de tallo (0,01 – 0,05 g), hoja (0,05 – 0,06 g) y peso de biomasa total (0,05 – 0,11 g), mientras que el tratamiento ML+N, tuvo el promedio más alto

de biomasa en raíces (0,03 g).

Los índices de calidad confirmaron el efecto favorable de los biofermentos sobre el balance morfoestructural de las plantas de *P. volubilis* L. Los tratamientos con biofermentos presentaron de 1 a 2 valores menos de AP/LR, 6,0 valores menos en índice de esbeltez y 1 valor menos en la relación biomasa seca aéreo y radical respecto al testigo, mientras que el índice de calidad de Dickson aumentó de 0,11 en el testigo a 0,21 – 0,22 en las plantas tratadas. Paralelamente, el índice de calidad de Dickson aumentó entre 90 y 100%, respecto al testigo, lo que evidencia plantas con mayor diámetro, desarrollo radical y acumulación equilibrada de biomasa, en lugar de un crecimiento predominante longitudinal.

Correlaciones entre variables

Se evidenciaron relaciones consistentes asociadas a la calidad de las plantas, visualizándose la dispersión de las observaciones y la forma de la asociación entre el ICD y las variables vinculadas con la biomasa y el equilibrio morfoestructural

(Fig. 2). El ICD mostró una tendencia creciente con BST y tendencias decrecientes con el IE y la relación BSA/BSR. Los ajustes cuadráticos describieron la curvatura observada dentro del intervalo evaluado, lo que indica que la variación del ICD, respecto a estas variables, no fue estrictamente lineal. Esto complementa la matriz de correlaciones de Pearson de la Tabla 6, porque permite examinar la dispersión y la forma de las relaciones, mientras que la matriz resume únicamente su dirección e intensidad lineal.

La matriz de correlación de Pearson (Tabla 6), confirmó asociaciones positivas entre el ICD y las variables relacionadas significativas y positivas con la biomasa seca, diámetro de tallo, desarrollo y crecimiento radical. En contraste, las variables vinculadas al crecimiento longitudinal (AP, IAP) y a los índices de balance estructural mostraron correlaciones negativas significativas con los atributos de robustez. Estos resultados indican que la calidad de las plantas de *P. volubilis* L. estuvo estrechamente vinculada con la acumulación de biomasa y el crecimiento del sistema radical que con el crecimiento longitudinal.

El análisis de componentes principales (ACP), mostró que la variación multivariada estuvo

dominada por un gradiente principal que separó las variables asociadas a robustez estructural y a biomasa de aquellas relacionadas con el crecimiento en altura y balance morfológico (Fig. 3). De manera concordante, el análisis discriminante canónico mostró una separación consistente entre el testigo y los biofermentos, identificando las variables de biomasa y estructura como las de mayor poder discriminante (Fig. 4). Estos resultados confirman la existencia de perfiles morfoestructurales diferentes entre las plantas con biofermentos en comparación con el testigo.

DISCUSIÓN

Efecto de tratamientos en las características morfológicas e índices de calidad

Los resultados evidenciaron que el biofermento comercial como el artesanal, mejoraron la expresión morfoestructural (diámetro de tallo, número y longitud de raíces, área foliar y biomasa seca), de las plantas de *P. volubilis* L. en vivero, en comparación con el testigo. En contraste, la altura de planta y el incremento de altura fueron mayores en el testigo sin biofermentos.

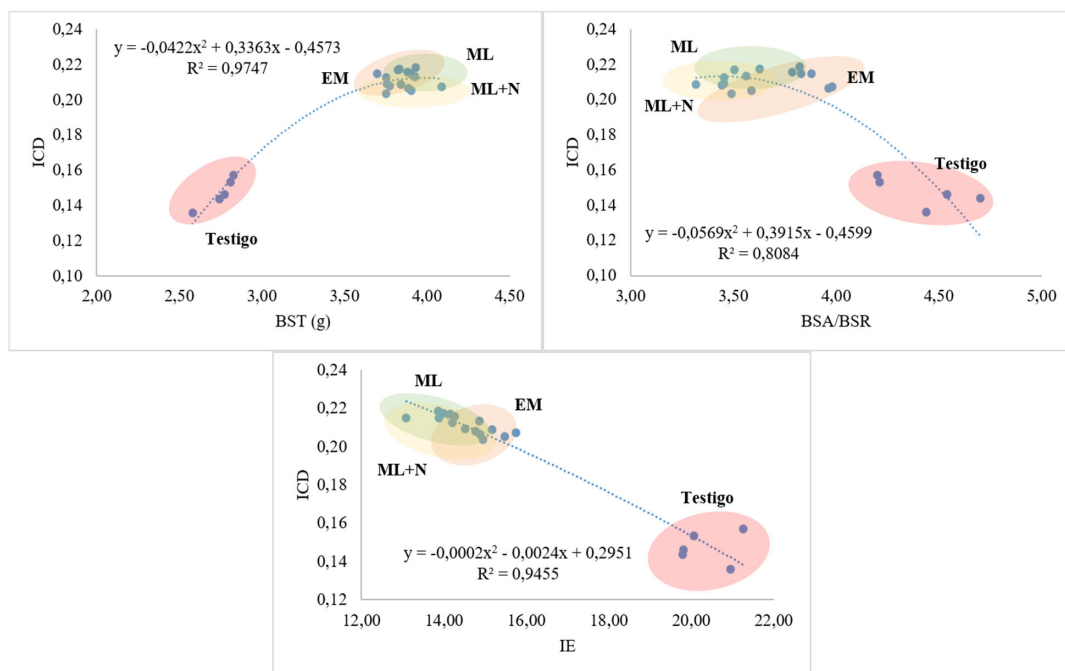


Fig. 2. Relación entre el índice de calidad de Dickson (ICD), biomasa seca total (BST), relación biomasa seca aérea / biomasa seca radical (BSA/BSR) y el índice de esbeltez (IE) de las plantas de *P. volubilis* L. en vivero.

Fig. 2. Relationship among the Dickson Quality Index (ICD), total dry biomass (BST), shoot-to-root dry biomass ratio (BSA/BSR), and slenderness index (IE) of *P. volubilis* L. plants under nursery conditions.

Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson entre atributos morfoestructurales, biomasa seca e índices de calidad de plantas de *P. volubilis* L. bajo tratamientos en vivero.
Table 6. Pearson correlation matrix of morphostructural attributes, dry biomass, and quality indices of *P. volubilis* L. plants under nursery treatments.

Variables	DT (mm)	AP (cm)	IAP (cm)	IDT (mm)	NºR	LR (cm)	AF (cm²)	BSTa (g)	BSH (g)	BSR (g)	BST (g)	AP/LR	IE	BSA/BS
AP (cm)	-0,70**													
IAP (cm)	-0,74**	0,98**												
IDT (mm)	0,71**	-0,33ns	-0,32 ns											
NºR	0,86**	-0,65**	-0,68**	0,66**										
LR (cm)	0,97**	-0,76**	-0,80**	0,66**	0,85**									
AF (cm²)	0,85**	-0,58*	-0,62**	0,63**	0,75**	0,91**								
BSTa (g)	0,88**	-0,67**	-0,72**	0,51*	0,62**	0,91**	0,84**							
BSH (g)	0,96**	-0,76**	-0,81**	0,60*	0,83**	0,96**	0,83**	0,89**						
BSR (g)	0,95**	-0,72**	-0,76**	0,63**	0,83**	0,98**	0,89**	0,90**	0,93**					
BST (g)	0,97**	-0,74**	-0,79**	0,60**	0,80**	0,98**	0,87**	0,95**	0,98**	0,97**				
AP/LR	-0,94**	0,88**	0,90**	-0,59*	-0,83**	-0,98**	-0,85**	-0,88**	-0,95**	-0,96**	-0,96**			
IE	-0,94**	0,90**	0,92**	-0,58*	-0,83**	-0,95**	-0,80**	-0,86**	-0,94**	-0,93**	-0,94**	0,99**		
BSA/BSR	-0,83**	0,61**	0,62**	-0,60*	-0,81**	-0,87**	-0,81**	-0,71**	-0,75**	-0,92**	-0,81**	0,84**	0,79**	
ICD	0,96**	-0,83**	-0,86**	0,61**	0,83**	0,98**	0,84**	0,91**	0,98**	0,96**	0,98**	-0,99**	-0,98**	-0,82**

Estos hallazgos sugieren que la presencia de comunidades microbianas, nutrientes y ácido indolacético presentes en los biofermentos, pudieron contribuir al mayor crecimiento y desarrollo del sistema radical observado respecto al testigo. Esta respuesta habría ampliado la superficie de absorción y el volumen de

sustrato explorado, atributos relevantes para la adquisición de agua y nutrientes durante las primeras etapas de crecimiento de las plantas (Lima et al., 2021). No obstante, debido a que los biofermentos constituyen mezclas complejas, no es posible atribuir esta respuesta exclusivamente a los microorganismos ni separar su efecto del

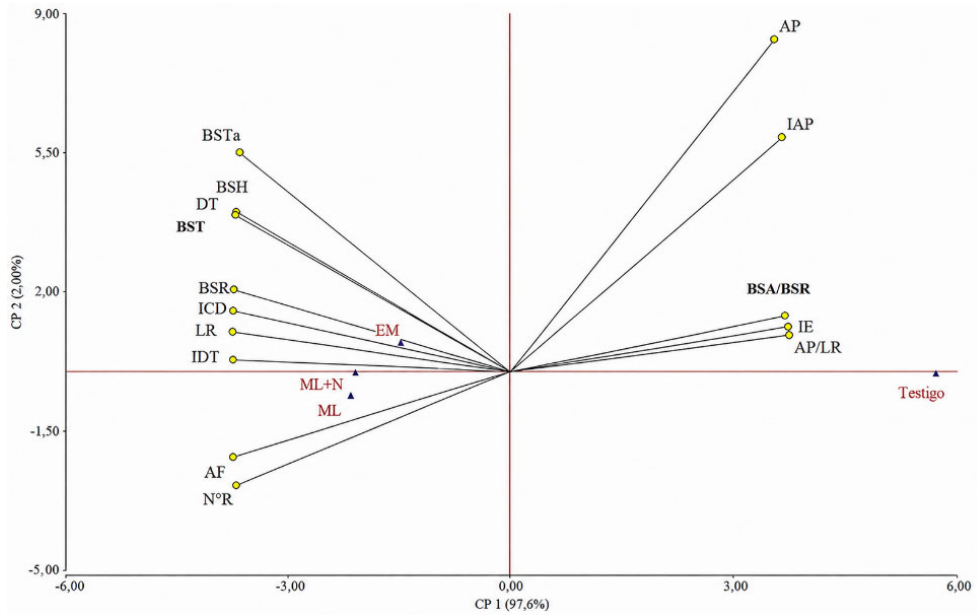


Fig. 3. Biplot del ACP con evidencia de la separación multivariada entre tratamientos y el gradiente estructural dominante en plantas de *P. volubilis* L.

Fig. 3. PCA biplot showing multivariate separation among treatments and the dominant structural gradient in *P. volubilis* L. plants.

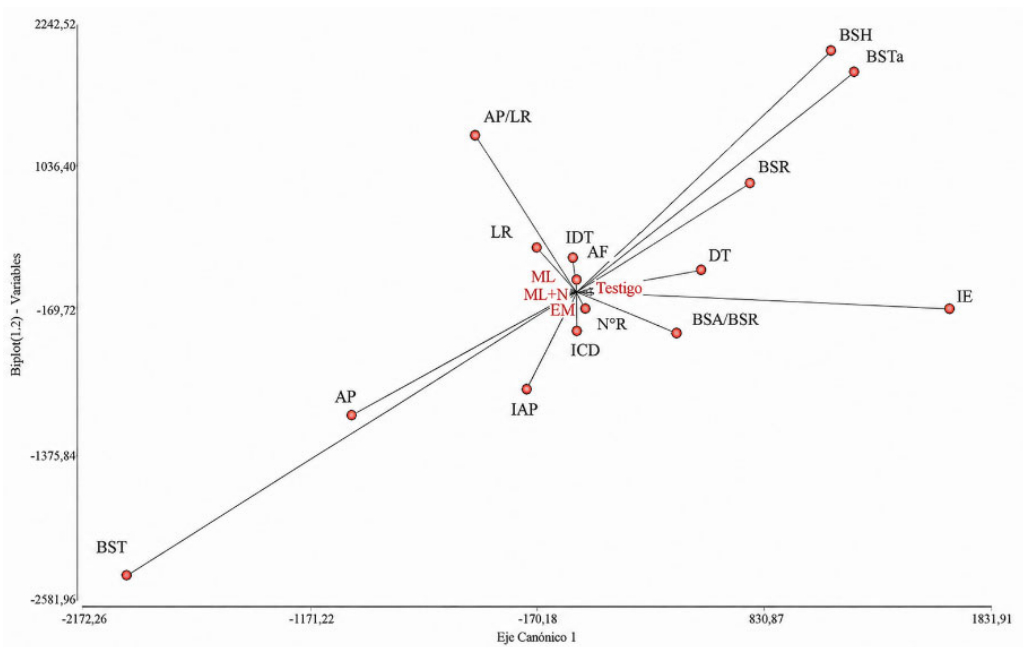


Fig. 4. Análisis discriminante canónico que expone la separación entre tratamientos basada en atributos morfoestructurales y biomasa, en plantas de *P. volubilis* L. en condiciones de vivero.

Fig. 4. Canonical discriminant analysis showing the separation among treatments based on morphostructural attributes and biomass in *P. volubilis* L. plants under nursery conditions.

aporte de nutrientes y metabolitos. Estudios realizados por Etesami y Glick (2024) y Santoyo et al. (2021), demostraron que los biofermentos con microorganismos rizosféricos puede modificar la arquitectura radical mediante la producción de fitohormonas como el ácido indolacético, compuestos volátiles y otros metabolitos secundarios que actúan como reguladores de crecimiento, permitiendo a las plantas incrementar la superficie de absorción radical y mejorar la eficiencia en la adquisición de nutrientes y agua.

El análisis microbiológico realizado a los biofermentos en este estudio mostró diferencias en la abundancia y presencia de algunos grupos microbiológicos entre los biofermentos artesanal (ML) y comercial (EM). El ML presentó mayores recuentos de microorganismos aeróbicos y bacterias fijadoras de nitrógeno, presencia de esporas de hongos micorrízicos arbusculares y una mayor concentración de ácido indolacético. Estas características pudieron contribuir al desarrollo radical y a la acumulación de biomasa observados en las plantas de *P. volubilis* L., aunque no es posible establecer una relación causal ni atribuir la respuesta exclusivamente a los microorganismos. En este sentido los consorcios pueden generar efectos complementarios mediante la combinación de distintas funciones metabólicas, pero su desempeño también depende de la compatibilidad y de las interacciones entre sus poblaciones (Singh et al., 2023). Estudios realizados por Liu et al. (2023) y Wang et al. (2022) reconocen que los biofermentos constituidos por poblaciones diversas de microorganismos generan efectos más consistentes en el crecimiento vegetal que los biofermentos, basados en una sola cepa o cepas específicas, por la complementariedad metabólica entre microorganismos y a la capacidad del biofermento de colonizar diferentes nichos dentro de la rizosfera.

Asimismo, la concentración de ácido indolacético determinada en el biofermento artesanal es relevante desde el punto de vista fisiológico que explica la mayor proliferación radical que presentaron los tratamientos inoculados. Esta fitohormona se ha relacionado con los procesos de elongación celular y aumento de la biomasa radical y la expansión y número de las raíces laterales, que a su vez esto contribuye a que las plantas se establezcan de mejor manera y temprana en sistemas de vivero (Etesami y Glick, 2024).

Los tratamientos con biofermentos presentaron incrementos significativos en la biomasa seca aérea y radical con respecto al testigo. Este resultado coincide con estudios recientes que

reportan que los biofermentos a base de diversas poblaciones de microorganismos pueden mejorar la eficiencia de la utilización de los nutrientes en este caso del sustrato y estimular una mayor tasa de crecimiento a través de procesos fisiológicos asociados a la producción de fitohormonas, solubilizadores de fosfatos y fijadores de nitrógeno (Mitter et al., 2021; Zampieri et al., 2023). La existencia de microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosfatos dentro de los bioinsumos de manera particular pudieron contribuir a mejorar la disponibilidad de nutrientes del sustrato que estimularon el crecimiento de las plantas de *P. volubilis* L.

Los análisis químicos del sustrato fueron exploratorios y no formaron parte del diseño experimental, sin embargo, permitieron contextualizar los hallazgos dentro de la interacción sustrato – microorganismos – planta. Los biofermentos también aportaron directamente nutrientes, debido a que ambos contenían N, K, Ca y Mg, mientras que el fermento artesanal contenía además P. Este aporte, junto con la actividad microbiana, podría estar relacionado con los valores numéricamente mayores de materia orgánica y los nutrientes registrados en los sustratos tratados. Sin embargo, debido al carácter descriptivo del análisis y la ausencia de réplicas analíticas independientes, estas diferencias no pueden atribuirse de manera concluyente a los tratamientos. Al respecto, Pradhan et al. (2026) y Yan et al. (2024) señalan que los consorcios microbianos pueden influir en los procesos de mineralización de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes del suelo, modificando la rizosfera y facilitando la absorción de nutrientes por las plantas.

Sin embargo, también se reconoce que el éxito depende de compatibilidad entre miembros del consorcio y del “encaje ecológico” con el ambiente del sustrato, lo que explica por qué en algunos casos no se observan diferencias entre consorcios inoculados (p. ej., EM vs ML vs ML+N), aunque todos superen al testigo. Esto coincide con los resultados reportados para consorcios y formulaciones bacterianas en distintos cultivos, donde se observa mejora general frente a control, pero diferencias finas entre consorcios pueden ser pequeñas o dependientes del contexto (Molina-Romero et al., 2021; Paganin et al., 2023).

El tratamiento ML+N, constituido por el biofermento artesanal complementado con extracto de *A. indica*, presentó el mayor valor numérico de longitud radical; sin embargo, no difirió estadísticamente del biofermento artesanal, aplicado solo ni del biofermento comercial. En el sustrato correspondiente a ML+N también se registraron valores numéricamente

mayores de conductividad eléctrica, N, P, K, Ca, Mg, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. No obstante, debido al carácter descriptivo del análisis, no es posible atribuir estas diferencias numéricas al extracto de *A. indica* de manera concluyente. Estas tendencias podrían relacionarse con la intervención del extracto de *A. indica* en procesos asociados con las transformaciones y la disponibilidad del N (Sriraj et al., 2022; Butnan et al., 2024). No obstante, debido al carácter exploratorio del análisis del sustrato, no es posible atribuir estos cambios al *A. indica* de manera concluyente, por lo que se requieren estudios específicos para confirmar su efecto.

Con respecto a los indicadores de calidad de plantas, el aumento significativo del índice de calidad de Dickson en los tratamientos con biofermento confirma que favorecieron una estructura morfoestructural más equilibrada en las plantas de *P. volubilis* L. Este índice es determinante, porque integra variables relacionadas a la altura, diámetro del tallo y distribución de biomasa seca, lo que permite evaluar la calidad de las plantas en vivero y estimar su potencial de supervivencia tras el trasplante. Este estudio sugiere que los biofermentos utilizados contribuyeron en el crecimiento de plantas más robustas y fisiológicamente equilibradas, lo que coincide con estudios sobre el uso de biofermentos con diversidad de microorganismos para mejorar la calidad estructural de las plantas en viveros forestales y agrícolas (Amaringo-Córdova et al., 2025; Díaz-Chuquizuta et al., 2025; Gallegos-Cedillo et al., 2024).

Correlaciones entre variables morfológicas e índices de calidad

El análisis de las correlaciones entre las variables estudiadas nos permitió identificar patrones que ayudan a interpretar las respuestas fisiológicas de las plantas de *P. volubilis* L., con respecto a la aplicación de los biofermentos microbianos. Las correlaciones positivas encontradas entre la biomasa seca total, el diámetro del tallo y las que están asociadas al crecimiento radical muestran que el aumento del peso de la biomasa seca estuvo ligado estrechamente a la mayor robustez de las plantas, sugiriendo que la acumulación de la biomasa seca no solo fue a nivel de altura de planta, sino que fue equilibrado en todos los órganos de la planta.

En cambio, las correlaciones negativas observadas entre el índice de esbeltez (IE) y el Índice de calidad de Dickson (ICD) indican que las plantas con mayor altura en relación con el diámetro del tallo, como ocurrió con el testigo,

presentaron menor calidad estructural. Esto coincide con estudios realizados en vivero, donde una elevada esbeltez se asocia con menor robustez, menor crecimiento radical y menor capacidad de tolerar el estrés posterior al trasplante (Kondo et al., 2024). Aunque esta respuesta también podría estar influenciada por las condiciones lumínicas del vivero, la luz no explicaría por sí solas las diferencias entre los tratamientos, debido a que todas las plantas estuvieron expuestas al mismo ambiente. En este contexto, la interacción entre los microorganismos benéficos presentes en los biofermentos y las plantas pudo modular la asignación del crecimiento mediante mecanismos nutricionales y hormonales, favoreciendo el diámetro del tallo, el desarrollo radical y acumulación de biomasa en lugar de elongación aérea, incluso, bajo diferentes intensidades lumínicas (Tan et al., 2022).

Esto se refuerza al encontrar correlación positiva entre la biomasa seca total y el índice de calidad de Dickson, el cual indicaría que la acumulación de biomasa seca es un determinante de la calidad de las plantas de *P. volubilis* L. Se ha reportado que la biomasa seca está relacionada con la capacidad fotosintética de la planta, favorecido por el uso y eficiencia de nutrientes del sustrato y la interacción con los microorganismos de la rizósfera (Lattacher et al., 2024; Negi et al., 2024). A raíz de estos resultados se sugiere que los biofermentos a base de consorcios microbianos estandarizados comerciales y no estandarizados artesanales favorecen la formación de sistema microbioma – planta, con la capacidad de ser eficiente y de optimizar la captura de recursos de su medio nutritivo (sustrato), y convertirlos en crecimiento equilibrado y estructurado.

Estudios relacionados con lo anterior (Lattacher et al., 2024; Vega-Celedón et al., 2021), vistos desde una perspectiva ecológica, han demostrado que el sistema radical tanto en su forma como en extensión influyen directamente en la composición del microbioma de la rizosfera, lo que, a su vez, retroalimentan los procesos fisiológicos que se asocian al crecimiento vegetal. Esto resalta la importancia de las correlaciones e interacciones entre la morfoestructural radical y las comunidades microbianas en el sustrato, que generan un sistema interdependiente entre el suelo, microorganismos y la planta.

Por último, los resultados del análisis de correlación confirman que las variables morfológicas asociadas al crecimiento radical y a la acumulación de biomasa seca son determinantes del índice de calidad en las plantas de *P. volubilis* L. Esto refuerza la interpretación que los biofermentos microbianos comerciales y locales, modulan procesos fisiológicos relacionados con

la absorción de nutrientes, la distribución de estos en planta para producir biomasa seca equilibrada y la interacción funcional con el microbioma del sustrato, más que estimular únicamente el crecimiento longitudinal de las plantas en vivero.

CONCLUSIONES

La aplicación del biofermento comercial y artesanal mejoró la calidad morfoestructural de plantas de *P. volubilis* L. en vivero, respecto al testigo, al favorecer el diámetro del tallo, el número y la longitud de raíces, el área foliar, la acumulación de biomasa seca y el índice de calidad de Dickson. Asimismo, los biofermentos redujeron la esbeltez y promovieron una distribución más equilibrada de la biomasa entre la parte aérea y el sistema radical. El biofermento artesanal mostró un desempeño comparable al comercial, lo que evidencia su potencial como alternativa para la producción de plantas robustas y equilibradas. La adición de extracto de *A. indica* no produjo ventajas comparables respecto al biofermento artesanal sin esta enmienda.

AGRADECIMIENTOS

Al Personal Técnico de la Estación Experimental Agraria El Porvenir y de la Dirección Regional de Agricultura de San Martín: Abel Nicolás Panduro Peñaherra, Segundo Otoniel Grández López, Gina Margoth Arellano Guerra.

Declaración sobre uso de IA generativa

Los autores declaran haber utilizado ChatGPT (OpenAI), versión GPT-5.6, como herramienta de apoyo en la introducción y discusión, así como en la revisión editorial del manuscrito y figuras. Su uso tuvo como finalidad mejorar la fluidez, gramática y claridad de redacción y apoyar la búsqueda de literatura relacionada. Los autores revisaron y validaron el contenido final.

Contribución de autores

Participación activa en la revisión bibliográfica: Percy Díaz-Chuquizuta, Roxana Callante-Mendoza; Participación activa en el desarrollo de la metodología: Percy Díaz-Chuquizuta, Ayda Karín Valles-Ramírez; Participación en la discusión de los resultados: Percy Díaz-Chuquizuta, Henry Díaz-Chuquizuta, César Porfirio Díaz-Chuquizuta; Revisión y aprobación de la versión final del artículo: Percy Díaz-Chuquizuta, Ayda Karín Valles-Ramírez, Henry Díaz-Chuquizuta, Roxana Callante-Mendoza, César Porfirio Díaz-Chuquizuta.

LITERATURA CITADA

- Abeka, H., I.Y.D. Lawson, E. Nartey, T. Adjadeh, S. Asuming-Brempong, P. Bindraban and W.K. Atakora. 2022. Effectiveness of neem materials and biochar as nitrification inhibitors in reducing nitrate leaching in a compost-amended Ferric Luvisol. *Frontiers in Soil Science* 2:1023743. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1023743>
- Amaringo-Córdova, L.P., C. Mori-Montero, C. Padilla-Castro, J.A. Ocaña-Reyes, C. Riveros-Lizana, A.A. Camacho-Villalobos and R. Solórzano-Acosta. 2025. Native microbial consortia: A sustainable strategy for improving the quality of forest seedlings in the Peruvian Amazon. *Forests* 16(2):309. <https://doi.org/10.3390/f16020309>
- Araujo, A.S.F., A.P.A. Pereira, E.V. de Medeiros and L.W. Mendes. 2025. Root architecture and the rhizosphere microbiome: Shaping sustainable agriculture. *Plant Science* 359:112599. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112599>
- Aybar-Camacho, C., W. Lavado-Casimiro, E. Sabino, S. Ramírez, J. Huerta, O. Felipe-Obando, and Y. Silva-Vidal. 2017. Atlas de zonas de vida del Perú: Guía explicativa. Nota Técnica N° 003 SENAMHI-DHI-2017. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú.
- Backer, R., J.S. Rokem, G. Ilangumaran, J. Lamont, D. Praslickova, E. Ricci, S. Subramanian and D.L. Smith. 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science* 9:1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Butnan, S., W. Kulna and P. Sriraj. 2024. Nitrogen transformation and growth-yield-quality responses of rice in the neem leaf extract applied and water-lowered soils. *Soil Science Annual* 75(2):190114. <https://doi.org/10.37501/soilsa/190114>
- Caldara, M., M. Gulli, S. Graziano, N. Riboni, E. Maestri, M. Mattarozzi, F. Bianchi, M. Careri and N. Marmiroli. 2024. Microbial consortia and biochar as sustainable biofertilisers: Analysis of their impact on wheat growth and production. *Science of the Total Environment* 917:170168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170168>

- Corazon-Guivin, M.A., S. Rengifo del Aguila, R.X. Corrêa, D. Cordova-Sinarahua, L. Costa Maia, D.K. Alves da Silva, G. Alves da Silva, Á. López-García, D. Coyne and F. Oehl. 2024. Native arbuscular mycorrhizal fungi promote *Plukenetia volubilis* growth and decrease the infection levels of *Meloidogyne incognita*. *Journal of Fungi* 10(7):451. <https://doi.org/10.3390/jof10070451>
- Cui, Q., J. Xia, H. Yang, J. Liu and P. Shao. 2021. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment* 756:143801.
- de Mendiburu, F. 2023. agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R package. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.agricolae>.
- Díaz-Chuquizuta, P., H. Díaz-Chuquizuta, Y. Arévalo-Aranda y J. Cuevas-Giménez. 2025. Biofermentos en la morfología y calidad de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en vivero. *Agroecosistemas Tropicales y Subtropicales* 28(3):119. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.6271>
- Díaz-Chuquizuta, P. and O.A. Valdés-Rodríguez. 2020. Growth of mahogany seedlings (*Swietenia macrophylla* King) in response to vegetable extracts. *Agrociencia* 54(5):673-681. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i5.2124>
- Etesami, H., and B.R. Glick. 2024. Bacterial indole-3-acetic acid: A key regulator for plant growth, plant-microbe interactions, and agricultural adaptive resilience. *Microbiological Research* 127602. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127602>
- Gallegos-Cedillo, V.M., C. Najera, N.S. Gruda, A. Signore, J. Gallegos, R. Rodríguez, J. Ochoa, C. Egea-Gilabert and J.A. Fernandez. 2024. An in-depth analysis of sustainable practices in vegetable seedlings nurseries: A review. *Scientia Horticulturae* 334:113342. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113342>
- Gifford, M.L., G. Xu, L.X. Dupuy, K. Vissenberg and G. Rebetzke. 2024. Root architecture and rhizosphere-microbe interaction. *Journal of Experimental Botany* 75(2):503-507. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad488>
- Gohardoust, M.R., A. Bar-Tal, M. Effati, and M. Tuller. 2020. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy* 10(9): 1403. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gouda, S., R.G. Kerry, G. Das, S. Paramithiotis, H.-S. Shin and J.K. Patra. 2018. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research* 206:131-140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Goyal, A., B. Tanwar, S. Kumar and V. Sharma. 2022. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): An emerging source of nutrients, omega-3 fatty acids and phytochemicals. *Food Chemistry* 373:131459. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131459>
- Kodahl, N. and M. Sørensen. 2021. *P. volubilis* L. (*Plukenetia volubilis* L.) is an underutilized crop with a great potential. *Agronomy* 11(6): 1066. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061066>
- Kondo, Y.R., S.P. da Cruz, C. Chanway and G. Kaschuk. 2024. Inoculation with *Azospirillum brasilense* or *Bacillus* spp. improves root growth and nutritional quality of araucaria (*Araucaria angustifolia*) seedlings. *Forest Ecology and Management* 568:122092. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122092>
- Lattacher, A., S.L. Gall, Y. Rothfuss, C. Gao, M. Harings, H. Pagel, M. Giraud, S. Alahmad, L.T. Hickey, E. Kandler and C. Poll. 2024. Rooting for microbes: Impact of root architecture on the microbial community and function in top- and subsoil. *Plant and Soil* 513:333-351. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07181-w>
- Lima, J.V., R.S. Tinôco, F.L. Olivares, G.S. Chia, J.A.G. de Melo and G.B. da Silva. 2021. Rhizobacteria modify root architecture and improve nutrient uptake in oil palm seedlings despite reduced fertilizer. *Rhizosphere* 19:100420. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100420>
- Liu, X., S. Mei and J. Falcão Salles. 2023. Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology* 190:105011. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105011>
- Mitter, E.K., M. Tosí, D. Obregón, K.E. Dunfield and J.J. Germida. 2021. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5:606815. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815>
- Molina-Romero, D., S. Juárez-Sánchez, B. Venegas, C.S. Ortiz-González, A. Baez, Y.E. Morales-García and J. Muñoz-Rojas. 2021. A bacterial consortium interacts with different varieties of maize, promotes the plant growth, and reduces the application of chemical fertilizer under field conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4:616757. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.616757>

- Negi, R., B. Sharma, F. Parastesh, S. Kaur, S.S. Khan, D. Kour, S. Singh, A.K. Rai, S. Rustagi, N. Yadav, S. Shreaz, T.A. Madouh and A.N. Yadav. 2024. Microbial consortia mediated regulation of plant defense: A promising tool for sustaining crops protection. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 134:102393. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102393>
- Paganin, P., C. Isca, F. Tasso, T. Calandrelli, G. Migliore, P.A. Marras, D. Medas, E. Dore, G. De Giudici, A.R. Sprocati and C. Alisi. 2023. A bacterial formula with native strains as alternative to chemical fertiliser for tomato crop. *Plant Growth Regulation* 102(2):251-266. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00993-3>
- Panchal, K.J., A. Sudhir and A.S. Prajapati. 2025. Engineering the plant microbiome: Synthetic community approaches to enhance crop protection. *Frontiers in Plant Science* 16:1705289. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1705289>
- Pascual, J.A., F. Ceglie, Y. Tuzel, M. Koller, A. Koren, R. Hitchings and F. Tittarelli. 2018. Organic substrate for transplant production in organic nurseries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38:35. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0508-4>
- Pradhan, S., N.G. Mitra and R.K. Sahu. 2026. Microbial consortia enhance wheat productivity, plant nutrition and soil fertility in Vertisols of Central India. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 9:1699269. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1699269>
- Restrepo, J., y D. Agredo. 2020. Reproducción masiva de microorganismos del bosque. p. 121-169. En J. Restrepo y D. Agredo (eds.). *Mierda a la carta: Un nuevo ABC de la agricultura orgánica*. Imágenes Gráficas BIC S.A.S., Cali, Colombia.
- Rodzi, N.A.R.M., and L.K. Lee. 2022. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Recent insight on phytochemistry, pharmacology, organoleptic, safety and toxicity perspectives. *Heliyon* 8(9):e10572. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10572>
- Santoyo, G., P. Guzmán-Guzmán, F.I. Parra-Cota, S. de la Luz Santos-Villalobos, M.C. Orozco-Mosqueda and B.R. Glick. 2021. Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy* 11(2):219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>
- Singh, A., V.K. Yadav, R.S. Chundawat, R. Soltane, N.S. Awwad, H.A. Ibrahim, K.K. Yadav and S.I. Vicas. 2023. Enhancing plant growth promoting rhizobacterial activities through consortium exposure: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11:1099999. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1099999>
- Song, X.P., M.X. Yan, Q. Liang, X.Q. Zhang, C.N. Li, M.K. Malviya, A. Sharma, Q. Khan, D.J. Guo, Y.X. Li, K.K. Verma and Y.R. Li. 2025. Recent advances in employing plant rhizobacteria for environmental stress mitigation in plants. *Plant Stress* 17:100947. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100947>
- Sriraj, P., B. Toomsan and S. Butnan. 2022. Effects of neem leaf extract on the soil properties, growth, yield, and inorganic nitrogen contents of lettuce. *Horticulturae* 8(12):1104. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121104>
- Supriyanto, S., Z. Imran, R. Ardiansyah, B. Auliyai, A. Pratama and F. Kadha. 2022. The Effect of Cultivation Conditions on *P. volubilis* L. (*Plukenetia volubilis* L.) Seed Production and Oil Quality (*Omega* 3, 6, 9). *Agronomy* 12 (3): 636. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030636>
- Talaat, N.B. 2019. Effective microorganisms: An innovative tool for inducing common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) salt-tolerance by regulating photosynthetic rate and endogenous phytohormones production. *Scientia Horticulturae* 250:254-265. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.052>
- Tan, B., Y. Li, D. Deng, H. Pan, Y. Zeng, X. Tan, W. Zhuang and Z. Li. 2022. Rhizosphere inoculation of *Nicotiana benthamiana* with *Trichoderma harzianum* TRA1-16 in controlled environment agriculture: Effects of varying light intensities on the mutualism-parasitism interaction. *Frontiers in Plant Science* 13:989155. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.989155>
- Vega-Celedón, P., G. Bravo, A. Velásquez, F. Cid, M. Valenzuela, I. Ramírez, I.N. Vasconez, I. Álvarez, M.A. Jorquera and M. Seeger. 2021. Microbial diversity of psychrotolerant bacteria isolated from wild flora of Andes Mountains and Patagonia of Chile towards the selection of plant growth-promoting bacterial consortia to alleviate cold stress in plants. *Microorganisms* 9(3):538. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030538>
- Wang, S., F. Zhu and Y. Kakuda. 2018. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity and uses. *Food Chemistry* 265:316-328. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.055>

- Wang, Y., H. Liu, Z. Shen, Y. Miao, J. Wang, X. Jiang, Q. Shen and R. Li. 2022. Richness and antagonistic effects co-affect plant growth promotion by synthetic microbial consortia. *Applied Soil Ecology* 170:104300. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104300>
- Yan, W., Y. Liu, A. Malacrino, J. Zhang, X. Cheng, C. Rensing, Z. Zhang, W. Lin, Z. Zhang and H. Wu. 2024. Combination of biochar and PGPBs amendment suppresses soil-borne pathogens by modifying plant-associated microbiome. *Applied Soil Ecology* 193:105162. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105162>
- Zampieri, E., E. Franchi, L. Giovannini, F. Brescia, F. Sillo, D. Fusini, I. Pietrini, M. Centritto and R. Balestrini. 2023. Diverse plant promoting bacterial species differentially improve tomato plant fitness under water stress. *Frontiers in Plant Science* 14:1297090. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1297090>

