

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Evaluación del efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* (Rifai)
formulado con biopolímeros a base de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos
en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

Estudiante

Samuel Garzón Niño

Asesores

Rogelio Trabanino, M.Sc.

Miguel Cocom, Ing. Agrónomo

Honduras, noviembre 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Agradecimientos

Agradezco especialmente a la Dra. Olivas, a la Dra. Palma y a todo el equipo de Rancho en Medio por su apoyo incondicional y su respaldo constante a lo largo de este proceso. Su guía y compromiso han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y estoy profundamente agradecido por su ayuda y motivación.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	3
Tabla de Contenidos	4
Lista de Figuras.....	7
Lista de Anexos	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos	14
Localización	14
Establecimiento del Ensayo en Campo	14
Diseño Experimental	15
Análisis Estadístico	15
Tratamientos.....	15
Aplicación de Tratamientos	16
Variables Evaluadas	16
Desarrollo radicular.....	16
Biomasa.....	17
Conteo de Nódulos	17
Rendimiento.....	17
Resultados y Discusión.....	18

	5
Desarrollo Radicular	18
Volumen	18
Longitud	18
Área	19
Diámetro	20
Biomasa	21
Conteo de Nódulos.	24
Rendimiento.....	25
Conclusiones	26
Recomendaciones.....	27
Anexos.....	31

Lista de Cuadros

Cuadro 1 Tratamientos utilizados en el cultivo de frijol inoculados con <i>T. Harzianum</i> . Zamorano, Honduras, 2024.....	15
Cuadro 2 Efecto de las distintas formulaciones de <i>T. harzianum</i> en el desarrollo radicular en el cultivo del frijol a los 30 (DDS) Zamorano, Honduras, 2024.....	21
Cuadro 3 Efecto de las distintas formulaciones de <i>T.harzianum</i> en el desarrollo radicular en el cultivo del frijol a los 45 días después de siembra Zamorano, Honduras, 2024	21
Cuadro 4 Efecto de las distintas formulaciones de <i>T.harzianum</i> en el Peso seco, de la raíz y follaje a en el cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) a los 30(DDS).....	22
Cuadro 5 Efecto de las distintas formulaciones de <i>T.harzianum</i> en el Peso seco, de la raíz y follaje a en el cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) a los 45(DDS).....	23
Cuadro 6 Efecto de las distintas formulaciones de <i>T.harzianum</i> en diferentes etapas del cultivo para las variables de peso Fresco total y Peso seco total, Raíz y la parte vegetativa) en el cultivo de frijol.a los 45(DDS)	23
Cuadro 7 Evaluación de la influencia de los tratamientos en la nodulación en la raíz de frijol.	24
Cuadro 8 Efecto de las distintas formulaciones para <i>T.harzianum</i> en diferentes etapas del cultivo para la variable rendimiento en el cultivo de frijol. Zamorano, Honduras, 2024	25

Lista de Figuras

Figura 1 Localización de la parcela experimental del cultivo de frijol. Zamorano, Honduras, 202414

Lista de Anexos

Anexo A Cultivo de frijol a los 30 DDS.....	31
Anexo B Distribución de tratamientos por Bloque	32
Anexo C Aplicación de tratamientos a loa 15 DDS.....	33
Anexo D Extracción de plantas a los 30 DDS.....	34
Anexo E Escaneo de raíz con el escáner Epson Perfection V800	35
Anexo F Imagen obtenida por el software WinRHIZO	36

Resumen

Los productos biológicos basados en microorganismos con efecto bioestimulante representan una alternativa prometedora para la agricultura moderna, al incrementar la producción y eficiencia en el uso de estos recursos. Este experimento evaluó el efecto de dos formulaciones con diferentes concentraciones (80 y 100%) de biopolímeros a base de ácidos húmicos y fúlvicos, enfocándose en su capacidad como vehículo de transporte de *Trichoderma harzianum* y su impacto en el desarrollo radicular, peso seco de la raíz y parte aérea, así como el rendimiento por hectárea del cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). El estudio se llevó a cabo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar (BCA) con tres bloques y siete tratamientos, incluyendo un testigo. Se aplicaron los tratamientos a los 15 y 30 días después de la siembra (DDS). El muestreo se realizó 15 días después de cada aplicación, extrayendo la planta completa para analizar el desarrollo radicular mediante el programa WinRHIZO. Este programa permitió determinar los parámetros de volumen, área, diámetro y longitud de las raíces. Los resultados mostraron que la aplicación de *Trichoderma sp* con los biopolímeros promovieron un desarrollo radicular significativamente mayor, con un incremento de hasta cuatro veces en comparación con los sustratos inertes (bentonita y tierras de diatomeas). En cuanto al rendimiento, los tratamientos de *Trichoderma sp* formulados con biopolímeros incrementaron los rendimientos en un 200%, de grano cosechado por hectárea. El biopolímero 80% fue especialmente efectivo en aumentar el rendimiento del cultivo de frijol.

Palabras clave: biomasa, desarrollo radicular, ingredientes inertes, peso seco, rendimiento

Abstract

Biological products based on microorganisms with biostimulant effects represent a promising alternative for modern agriculture, this experiment evaluated the effect of two formulations with different concentrations of biopolymers (80 y 100%) based on humic and fulvic acids, focusing on their capacity as transport vehicles for *Trichoderma harzianum* and their impact on root development, fresh and dry weight of roots and aerial parts, as well as yield per hectare in common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivation. The study was conducted at the Zamorano Panamerican Agricultural School in Honduras. A completely randomized block design (CRBD) with three blocks and seven treatments, including a control, was used. Treatments were applied 15 and 30 days after sowing (DAS). Sampling took place 15 days after each application, with the entire plant being extracted to analyze root development using the WinRHIZO software. This program enabled the determination of root parameters, including volume, area, diameter, and length. Results showed that the application of *Trichoderma* sp. with biopolymers promoted significantly greater root development, with up to fourfold increases compared to inert substrates (bentonite and diatomaceous earth). In terms of yield, *Trichoderma* sp. treatments formulated with biopolymers increased harvested grain yield per hectare by 200%. Biopolymer 80% was particularly effective in enhancing bean crop yield.

Keywords: biomass, dry weight, inert ingredients, root development, yield

Introducción

La agricultura mundial enfrenta el desafío de alimentar a una población en constante crecimiento, que se espera, alcance los 9.7 mil millones de personas para 2050 (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2021) con el fin de satisfacer la creciente demanda. El enfoque tradicional para abordar los desafíos de la producción de alimentos ha implicado el uso de pesticidas, fertilizantes químicos y semillas modificadas genéticamente. La acumulación de fertilizantes químicos en el suelo tiene consecuencias ambientales como la destrucción de las poblaciones microbianas del suelo, la contaminación ambiental y la entrada de nitratos en el ciclo alimentario humano (L. P. Canellas et al., 2015). Recientemente, se ha demostrado que el uso de bioestimulantes representa una alternativa en la producción de cultivos debido al impacto positivo en la absorción de nutrientes, promoción de crecimiento, rendimiento y tolerancia a diferentes tipos de estrés (Du Jardin, 2015).

Los bioestimulantes son definidos como un grupo de sustancias o microorganismos benéficos que inducen respuestas fisiológicas en las plantas, especialmente bajo condiciones desfavorables, y conducen a mejorar su desempeño coadyuvando a la tolerancia frente al estrés (Shahrajabian et al., 2021). Estos comprenden ácidos húmicos y fúlvicos, hidrolizados de proteínas, aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, oligosacáridos, compuestos inorgánicos, extractos de algas y productos botánicos, además de los insumos a base de microorganismos (Bhupenchandra et al., 2020; Du Jardin et al., 2020, Shahrajabian et al, 2021).

Los ácidos húmicos son compuestos de alto peso molecular que son solubles en condiciones alcalinas, mientras que los ácidos fúlvicos son compuestos de peso molecular comparativamente menor que son solubles tanto en condiciones ácidas como alcalinas (Calvo et al., 2014). Debido a su menor tamaño, los ácidos fúlvicos pueden ser absorbidos más fácilmente por las raíces, tallos y hojas a través del intercambio catiónico, difusión y transporte activo, lo que facilita la absorción de

minerales y nutrientes en las plantas, mejorando así el crecimiento vegetal (Mylonas y McCants, 1980; Zhang et al., 2021).

La aplicación de sustancias húmicas puede mejorar las características del suelo al aumentar su porosidad, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua (Ampong et al., 2022). El crecimiento de las plantas se ve favorecido por las sustancias húmicas al causar cambios estructurales y fisiológicos en las raíces y brotes, lo que mejora la eficiencia en el uso de nutrientes y mejoran la tolerancia de las plantas al estrés abiótico (L. P. Canellas et al., 2015). Las sustancias húmicas pueden tener un impacto positivo en la calidad y el rendimiento de los cultivos hortícolas al mejorar el crecimiento de brotes y raíces, el contenido de clorofila y la fotosíntesis, así como el tiempo de floración y el número y tamaño de frutos y flores (Drobek et al., 2019).

Los inoculantes microbianos se han revelado como un método prometedor para aumentar el rendimiento de los cultivos y mejorar la calidad general de la producción agrícola. Los productos a base de *Trichoderma* han captado la atención de investigadores y productores agrícolas por su capacidad de aumentar la resistencia de las plantas a diversos estreses bióticos y abióticos. Además, estos productos pueden mejorar la calidad nutricional de los cultivos y contribuir a una agricultura sostenible (Fiorentino et al., 2018). *Trichoderma*, es un género de hongos filamentosos ampliamente utilizado en la agricultura debido a sus propiedades y usos diversos, destacando su habilidad para funcionar como un agente bio - controlador contra diversos fitopatógenos. El éxito de *Trichoderma* se basa en múltiples mecanismos de acción, que incluyen antibiosis, mico parasitismo, competencia por espacio y nutrientes, producción de enzimas y metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana y la estimulación de la respuesta de defensa de las plantas ante los patógenos (Marchuk Larrea et al., 2024). De acuerdo a López-Bucio et al. (2015), *Trichoderma* ha cobrado importancia como bio - estimulante vegetales microbianos en horticultura. En el pasado, los productos a base de *Trichoderma* se destacaron particularmente como agentes de control biológico exitosos para contrastar patógenos de plantas, principalmente hongos fitopatógenos, así como para inducir resistencia a estreses bióticos.

(G. E. Harman, 2000; Gary E. Harman et al., 2004; Hermosa et al., 2012; Lorito y Woo, 2015; Woo et al., 2014) Sin embargo, además de su actividad como biopesticida, se ha demostrado que algunas cepas de *Trichoderma* poseen actividad bioestimulante, promueven el crecimiento de las plantas, mejoran el rendimiento y la calidad nutricional, así como mitigan los efectos perjudiciales del estrés abiótico.

Para fines de este estudio se evaluaron 3 ingredientes inertes, en diferentes formulaciones tales como la bentonita, los biopolímeros y las tierras de diatomeas. La bentonita, es una arcilla de origen volcánico compuesta principalmente por montmorillonita, un mineral de estructura laminar que le permite absorber grandes cantidades de agua y expandirse hasta varias veces su tamaño en seco. Esta capacidad de hinchamiento y su naturaleza coloidal hacen que sea idóneo como soporte para formular microorganismos debido a sus propiedades fisicoquímicas. Los biopolímeros provenientes de fermentaciones vegetales son un polímero natural obtenido a través de la bioconversión de materiales vegetales mediante procesos de fermentación. En este proceso, microorganismos, como bacterias o hongos, fermentan materias primas de origen vegetal (como residuos de cultivos o materiales ricos en azúcares) y producen biopolímeros, como ácidos húmicos, fúlvicos o polisacáridos. Las tierras de diatomeas por su naturaleza inerte y orgánica están compuestas por restos fosilizados de algas unicelulares que forman estructuras porosas, lo que permite una excelente capacidad de absorción y retención de agua, protegiendo a los microorganismos durante su almacenamiento y facilitando su liberación gradual en el suelo. Esta capacidad porosa también permite una buena aireación, que es crucial para mantener la viabilidad de los microorganismos.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de las siete formulaciones de *Trichoderma sp.* utilizando ingredientes inertes como la bentonita, las tierras de diatomeas y dos formulaciones de biopolímeros como soporte para el transporte del hongo en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Materiales y Métodos

Localización

El estudio fue realizado en la unidad de control biológico de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano localizada en el departamento de Francisco Morazán, Honduras, Ubicada a 32 km al este de Tegucigalpa, Honduras ubicada a 14o latitud norte y 87o longitud oeste, con una precipitación promedio de 1100 mm por año, una temperatura promedio de 27.25 oC y una altura de 800 msnm (Figura 1).

Figura 1

Localización de la parcela experimental del cultivo de frijol. Zamorano, Honduras, 2024



Establecimiento del Ensayo en Campo

Se estableció una parcela de 2000 metros cuadrados del cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), de la variedad "Deorho" a una densidad de siembra de 200,000 plantas por hectárea a doble hilera con una distancia interlineal de 1.5m (Anexo A).

Diseño Experimental

Se implementó un diseño de bloques completamente al azar (BCA) con tres bloques y siete tratamientos, resultando en un total de 21 unidades experimentales (Anexo B). Cada unidad experimental correspondió a una subparcela con dimensiones de 30 m² (6.7 m x 4.5 m).

Análisis Estadístico

Para las variables desarrollo radicular, biomasa, conteo de nódulos y rendimiento se realizó una ANDEVA y una separación de medias con una prueba Duncan, con una probabilidad ($P < 0.05$). Se usó el programa Statistical Analysis System Online (SAS®).

Tratamientos

Se formuló el hongo *Trichoderma harzianum* utilizando tres tipos de materiales inertes: bentonita, biopolímeros sin esterilizar, biopolímeros esterilizados y tierras de diatomeas, evaluando así factores como la estabilidad del inóculo, su dispersión y su compatibilidad con los diferentes ingredientes inertes. Los tratamientos evaluados se presentan en el Cuadro 1.

Se formularon dos variantes de biopolímeros, evaluadas por separado. La primera formulación estuvo compuesta de 80% de biopolímeros y la segunda formulación estuvo compuesta de un 100% de biopolímeros.

Los biopolímeros también fueron sometidos a un proceso de esterilización a 15 PSI, con una temperatura de 121 °C por 30 minutos, debido a su procedencia de fermentaciones vegetales, esto se realizó para analizar el efecto de la esterilización sobre la eficacia de la formulación.

Cuadro 1

Tratamientos utilizados en el cultivo de frijol inoculados con T. Harzianum. Zamorano, Honduras, 2024.

Tratamientos	Número de tratamiento	Dosis
Bentonita	1	240g/ha
Biopolímero A (80%)	2	5kg/ha
Biopolímero B (100%)	3	5kg/ha

Tratamientos	Número de tratamiento	Dosis
Tierras Diatomeas	4	240g/h
Biopolímero A 80% Estéril	5	5kg/ha
Biopolímero B 100% Estéril	6	5kg/ha
Testigo	7	Agua

Se realizó una fertilización a la siembra de 18-46-0 a una dosis de 68 kg/ha, dosis recomendada de fósforo por (Jesús del Rosario Ruelas-Islas et al., 2023) y se aplicó Urea en a una dosis de 151 kg/ha a los 40 días después de siembra (DDS).

Aplicación de Tratamientos

Se realizaron dos aplicaciones de los tratamientos, a los 15 días después de la siembra (DDS), y a los 30 DDS. Todos los tratamientos fueron formulados con *Trichoderma harzianum* a una concentración de 1.3×10^9 esporas por gramo (Anexo C).

Los tratamientos fueron aplicados utilizando un volumen de agua de 1.95 L por unidad experimental, siendo estos aplicados a la base de la planta empleando una bomba de mochila manual para asegurar una distribución uniforme. Los tratamientos con biopolímeros fueron aplicados con una dosis de 5kg/ha siguiendo la recomendación comercial.

Para los tratamientos que utilizaron otros materiales inertes, como la bentonita y la tierra de diatomeas, se aplicaron con una dosis de 240 g/ha.

Variables Evaluadas

Desarrollo Radicular

El desarrollo radicular fue evaluado a los 15 días después de la aplicación de los tratamientos, se extrajeron 5 plantas por unidad experimental, resultando en un total de 15 plantas por tratamiento (Anexo D). Las plantas fueron cuidadosamente retiradas del suelo para preservar la integridad de las raíces. Las raíces fueron analizadas utilizando el escáner Epson Perfection V800 (Anexo E) y el software WinRHIZO, que a partir de las imágenes obtenidas (Anexo F), permitió medir las variables longitud, diámetro, área superficial y volumen de las raíces.

Biomasa

De las mismas muestras tomadas en ambos muestreos (30 y 45 DDS), se registró el peso fresco de la parte vegetativa y de la raíz. Posteriormente, las muestras se secaron en un horno a 70 °C durante 48 horas para determinar el peso seco.

Conteo de Nódulos

Se realizó un conteo de nódulos por muestras de raíz para evaluar el efecto de los tratamientos en esta variable.

Rendimiento

A los 75(DDS), se cosechó un metro lineal de cada unidad experimental. Y se pesaron los granos cosechados por unidad experimental para calcular el rendimiento de cada tratamiento.

Resultados y Discusión

Desarrollo Radicular

Volumen

Se observó que a los 30 DDS las plantas donde se aplicó los tratamientos formulados con biopolímero B y el biopolímero A esterilizado, presentaron los mayores volúmenes de raíz en cm³ (Cuadro 2). Así mismo, el biopolímero A y biopolímero B mostraron un desarrollo radicular significativamente mayor en comparación con los tratamientos formulados con materiales inertes como bentonita y tierras de diatomeas, lo cual demuestra un incremento del volumen radicular cuando se aplica *Trichoderma sp.* mezclado con ácidos fúlvicos y ácidos húmicos.

A los 45 DDS se observó que los tratamientos de *Trichoderma* formulados con los biopolímeros y las tierras de diatomeas no presentaron diferencias significativas en el volumen radicular, pero sí presentaron diferencias frente a el tratamiento formulado con bentonita y el testigo siendo está el doble (Cuadro 3). Este aumento podría atribuirse a una mayor disponibilidad de nutrientes o una mejora en la interacción con la rizosfera de la raíz. Un estudio de Martins et al. (2024), mostró cómo productos a base de ácidos húmicos y fúlvicos mejoraron el crecimiento vegetativo y el volumen radicular en plantas de petunia, destacando incrementos en la biomasa y en la absorción de nutrientes cuando se aplicaron regularmente, en comparación con tratamientos sin biopolímeros.

Longitud

Los resultados obtenidos en el muestreo de la raíces del frijol realizado a los 30 (DDS), se observó que los tratamientos de *Trichoderma sp* formulados con biopolímero A , biopolímero B y biopolímero A esterilizado presentaron las mayores longitudes que el resto de los tratamientos, al evaluar la longitud de los materiales inertes como la bentonita, tierras de diatomeas y el testigo, presentaron las longitudes de las raíces de menor longitud que el resto de los tratamientos, el tratamiento que presentó mayor desarrollo longitudinal de raíz frente a los otros tratamientos fue el biopolímero B (Cuadro 2), Este hallazgo resalta el papel positivo de los biopolímeros, y en particular

de los ácidos húmicos y fúlvicos, en la promoción del crecimiento radicular de *Phaseolus vulgaris*, coincidiendo con lo reportado por estudios previos sobre la mejora en la absorción de nutrientes y el desarrollo de raíces gracias a estos compuestos (Binsfeld et al., 2014).

En el muestreo a los 45 DDS se observó un desarrollo longitudinal de raíz superior por las plantas tratadas con *Trichoderma* y biopolímeros, siendo el biopolímero B el que más obtuvo desarrollo longitudinal (Cuadro 3), también es importante recalcar que los tratamientos formulados con tierras de diatomeas, bentonita y el testigo, presentaron las menores longitudes y no fueron estadísticamente diferentes entre ellos ($p < 0.5$). Estos resultados comprueban que los tratamientos de *Trichoderma* formulados con los biopolímeros a base de ácidos húmicos y fúlvicos presentan una elongación de raíz más efectiva en comparación con los tratamientos como la bentonita y las tierras de diatomeas. Esto debido al efecto bioestimulante de los ácidos húmicos y los ácidos fúlvicos presentes en los biopolímeros.

Investigaciones previas han demostrado que el tratamiento de semillas con ácidos húmicos favorece no solo el alargamiento de la raíz, sino también un incremento en la masa de materia seca en las etapas iniciales del desarrollo del frijol (Binsfeld et al., 2014). Los biopolímeros constituyen una herramienta eficaz para mejorar el desarrollo radicular y potencialmente el rendimiento final del cultivo.

Área

Al evaluar el área radicular en cm^2 se observó que el tratamiento formulado con el biopolímero B presentó una mayor área superficial a los 30DD con una media de 77.32 cm^2 (Cuadro 2), siendo esta 4 veces mayor a la presentada por el tratamiento testigo que obtuvo una media de 20.20 cm^2 , a los 45 DDS, las plantas tratadas con el biopolímero B esterilizado y sin esterilizar obtuvieron la mayor área superficial siendo esta 228% mayor a la presentada por el testigo (Cuadro 3). Estos hallazgos son consistentes con los de Valero Valero et al. (2023) donde observaron un incremento del 321% en el área superficial de plántulas de frijol guajiro tratadas con bioestimulantes,

destacando la capacidad de estos productos para mejorar el desarrollo radicular, lo cual podría indicar un papel clave en la activación de procesos que favorecen el crecimiento radicular, que posteriormente mejora en la absorción de agua y nutrientes o la estimulación de la actividad microbiana en la rizosfera.

Diámetro

No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos solamente frente al testigo a los 30 DDS, el tratamiento formulado con tierras de diatomeas fue el que presentó el mayor incremento en el diámetro, y el biopolímero B esterilizado fue el que presentó un menor diámetro que todos los tratamientos (Cuadro 2). A los 45 DDS nuevamente el tratamiento formulado con tierras de diatomeas presentó el mayor promedio de diámetro, también es interesante que el tratamiento formulado con el biopolímero B que obtuvo el menor diámetro, esto pudo haber sido debido a que el mismo tratamiento fue el que presentó mayor elongación.

Un estudio relevante que aborda la relación entre la elongación de raíces y su diámetro evalúa cómo la impedancia del suelo afecta el crecimiento radicular. Este estudio indica que "la impedancia del suelo tiene un efecto inverso en la tasa de elongación y directo en el grosor medio de la raíz" (Pire y Pereira, 2018). Específicamente, se observa que a medida que las raíces experimentan un mayor alargamiento, su diámetro tiende a disminuir, lo cual es una adaptación para poder penetrar en poros más pequeños del suelo.

La aplicación de bioestimulantes a base de ácidos húmicos y fúlvicos tiene un efecto directo en el desarrollo radicular, ya que promueven la expansión de las raíces y mejoran la absorción de nutrientes y agua. Diversos estudios han demostrado que los ácidos húmicos estimulan la elongación y ramificación de las raíces, favoreciendo una mayor biomasa radicular y un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo (L. P. Canellas et al., 2015). Estos compuestos mejoran la estructura del suelo y facilitan la interacción de las plantas con los microorganismos beneficiosos en la rizosfera, lo que también contribuye al aumento de la producción y la eficiencia en el uso de recursos.

Cuadro 2

Efecto de las distintas formulaciones de T. harzianum en el desarrollo radicular en el cultivo del frijol

a los 30 (DDS) Zamorano, Honduras, 2024

Tratamientos	Volumen cm ³	Longitud cm	Diametro mm	Area cm ²
Bentonita	0.42 c [‡]	155.83 d	0.6453 ab	28.33 c
Biopolímero A (80%)	0.71 b	340.51 abc	0.6518 ab	55.16 b
Biopolímero B (100%)	0.99 a	451.74 a	0.6160 bc	77.32 a
Tierras Diatomeas	0.45 c	175.13 d	0.6937 a	30.50 c
Biopolímero A Esterilizado	0.93 a	431.94 ab	0.5990 bc	70.91 a
Biopolímero B Esterilizado	0.72 b	314.03 c	0.5670 c	53.08 b
Testigo	0.32 c	105.83 d	0.6329 ab	20.20 c
P	<.0001	<.0001	<0.0037	<0.0001
R ²	0.728839	0.672273	0.371352	0.710873
CV	31.28518	44.80774	18.41308	36.66141

[‡]Nota. Valor con diferente letra (abcd). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Cuadro 3

Efecto de las distintas formulaciones de T.harzianum en el desarrollo radicular en el cultivo del frijol a

los 45 días después de siembra Zamorano, Honduras, 2024

Tratamientos	Volumen cm ³	Largo cm	Diametro mm	Area cm ²
Bentonita	0.85 b [‡]	268.27 d	0.6453 ab	53.18 e
Biopolímero A (80%)	1.43 a	453.89 bc	0.6518 ab	89.43 b
Biopolímero B (100%)	1.58 a	551.49 b	0.6160 bc	104.26 ab
Tierras Diatomeas	1.34 a	378.57 cd	0.6937 a	78.92 cd
Biopolímero A Esterilizado	1.5 a	547.69 b	0.5990 bc	101.11b
Biopolímero B Esterilizado	1.68 a	710.47 a	0.5670 c	121.62 a
Testigo	0.95 b	297.79 d	0.6329 ab	53.18 de
P	<.0001	<.0001	<0.0002	<0.0001
R ²	0.490077	0.601536	0.416859	0.573929
CV	32.63778	37.19617	13.18352	32.37338

[‡]Nota. Valor con diferente letra (abcde). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Biomasa

En los resultados observados en la variable de peso seco de raíz podemos evidenciar que los tratamientos formulados con los biopolímeros fueron los que presentaron un mayor peso seco de raíz, el biopolímero B fue el que dio una mayor media de peso, siendo esta tres veces mayor que la

observada en el testigo, esto en el primer muestreo, en el segundo muestreo tampoco hubo diferencias significativas entre los tratamientos formulados con los biopolímeros, siendo nuevamente el biopolímero B el que dio mayor promedio de peso seco, siendo este igualmente 3 veces mayor que el testigo.

En la variable de peso seco foliar del muestreo a los 30 (DDS), no hubo diferencias significativas entre los tratamientos, donde el biopolímero A fue el que presentó una mayor media de peso seco foliar donde se evidencio 3 veces mayor peso frente al testigo (Cuadro 6). A los 45 (DDS) los tratamientos formulados con los biopolímeros presentaron el mayor peso seco foliar, el Biopolímero B esterilizado fue el que presentó mayor peso seco, siendo esta casi cuatro veces mayor que la del testigo. aquí podemos concluir que por el ingrediente activo de los biopolímeros a base de ácidos húmicos y fúlvicos que estimulan el crecimiento radicular se lograron estos resultados (Cuadro 6).

Estudios previos han documentado efectos similares de los ácidos húmicos y fúlvicos en la mejora de la biomasa foliar y radicular. Nardi et al. (2021), encontraron que los ácidos húmicos mejoran el crecimiento foliar al facilitar la absorción de nutrientes y aumentar la actividad hormonal de la planta, especialmente en condiciones de estrés moderado. Asimismo, Martins et al. (2024) reportaron un incremento significativo en la biomasa foliar en plantas tratadas con biopolímeros a base de ácidos húmicos, lo que respalda la hipótesis de que estos compuestos pueden mejorar el rendimiento agrícola al optimizar el desarrollo de la planta en las primeras etapas.

Cuadro 4

Efecto de las distintas formulaciones de T.harzianum en el Peso seco, de la raíz y follaje a en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) a los 30(DDS).

Tratamientos	Peso seco Raíz (g)	Peso seco Foliar (g)
Bentonita	0.65 bc [‡]	6.26ab
Biopolímero A (80%)	0.82 ab	11.12 a
Biopolímero B (100%)	1.10 a	7.87 ab
Tierras de Diatomeas	0.69 bc	4.87 ab
Biopolímero A 80% Esterilizado	1.00 ab	9.25 ab
Biopolímero B 100% Esterilizado	0.91 ab	9.5 ab

Tratamientos	Peso seco Raíz (g)	Peso seco Foliar (g)
Testigo	0.37 c	3.62 b
P	0.0018	0.2034
R ²	0.714692	0.437269
CV	31.86212	54.34801

¥ Nota. Valor con diferente letra (abc). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Cuadro 5

Efecto de las distintas formulaciones de T.harzianum en el Peso seco, de la raíz y follaje a en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) a los 45(DDS).

Tratamientos	Peso seco Raíz (g)	Peso seco Foliar (g)
Bentonita	2.03 b [¥]	45.50 bc
Biopolímero A (80%)	5.97 a	90.66 ab
Biopolímero B (100%)	6.37 a	91.00 ab
Tierras de Diatomeas	3.84 b	60.66 bc
Biopolímero A 80% Esterilizado	4.84 a	76.33 ab
Biopolímero B 100% Esterilizado	5.53 a	125.00 a
Testigo	2.03 b	32.33 b
P	0.0005	0.0379
R ²	0.875762	0.701123
CV	18.82298	34.23384

¥ Nota. Valor con diferente letra (abc). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Cuadro 6

Efecto de las distintas formulaciones de T.harzianum en diferentes etapas del cultivo para las variables de peso Fresco total y Peso seco total, Raíz y la parte vegetativa) en el cultivo de frijol a los 45(DDS) .

Tratamientos	Peso fresco foliar (g)	Peso seco planta (g)
Bentonita	321.07 b [¥]	47.53 bc
Biopolímero A (80%)	602.29 ab	99.63 ab
Biopolímero B (100%)	549.67 ab	97.37 ab
Tierras de Diatomeas	421.48 b	65.50 bc
Biopolímero A 80% Esterilizado	526.79 ab	81.14 abc
Biopolímero B 100% Esterilizado	816.88 a	130.54 a
Testigo	288.38 b	35.13 c
P	0.0337	0.0339
R ²	0.708822	0.708416
CV	29.87379	33.08784

¥ Nota. Valor con diferente letra (abc). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Conteo de Nódulos

Se observó un mayor incremento significativamente en la nodulación de las raíces de las plantas donde se aplicó tratamientos de *Trichoderma* formulados con biopolímeros frente a los otros tratamientos de materiales inertes, demostrando una mayor colonización de raíces por bacterias creadoras de nódulos nativas en presencia de ácidos húmicos y fúlvicos (Cuadro 7). Trabajos previos mostraron que el aumento de la población bacteriana asociada a las raíces de frijol podría explicarse en parte por la sorción de ácidos húmicos en la superficie de la pared celular de la planta, lo que se asocia con un aumento en la adherencia y colonización endofítica por estas (Canellas et al., 2013; Canellas y Olivares, 2014). Además, los principales sitios de infección para estas bacterias en leguminosas son los puntos de emergencia de las raíces laterales, que son inducidos por los ácidos húmicos y fúlvicos, además pueden contribuir al establecimiento mejorado de la población endofítica. Esto concuerda con los resultados similares a los de (Valero Valero et al., 2023) donde se evidenció un aumento de 78% en el número de nódulos formados por la simbiosis de frijol con rizobios nativos del suelo.

Cuadro 7

Evaluación de la influencia de los tratamientos en la nodulación en la raíz de frijol.

Tratamientos	Número de nódulos
Bentonita	2.66 b [‡]
Biopolímero A (80%)	16.13 a
Biopolímero B (100%)	17.40 a
Tierras de Diatomeas	6.86 b
Biopolímero A 80% Esterilizado	17.33 a
Biopolímero B 100% Esterilizado	15.00 a
Testigo	1.86 b
P	<0.0001
R ²	0.475423
CV	23.9

[‡] Nota. Valor con diferente letra (abc). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Rendimiento

El mayor rendimiento de grano se obtuvo en el Biopolímero A con un promedio de 4015 kg por hectárea (4.015 t/ha) siendo este dos veces mayor frente al testigo que obtuvo un rendimiento de 2050 kg por ha (2.05 t/ha), todos los tratamientos formulados con los biopolímeros no tuvieron diferencias significativas entre ellos pero si mostraron diferencias frente a los tratamientos formulados con bentonita y tierras de diatomeas que no mostraron diferencias significativas entre sí y con el testigo. Podemos concluir que al aplicar formulaciones con biopolímeros a base de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos podemos ver un incremento en la producción del cultivo (Cuadro 8), esto coincide con lo observado por Ortiz Enríquez et al. (2022) donde también el tratamiento formulado con bioestimulantes a base de ácidos fúlvicos aumentó el rendimiento de grano en 2,300 kg/ha (2.3 t/ha) frente al testigo, lo que comprueba el efecto de los bioestimulantes en el rendimiento del cultivo.

Cuadro 8

Efecto de las distintas formulaciones para T.harzianum en diferentes etapas del cultivo para la variable rendimiento en el cultivo de frijol. Zamorano, Honduras, 2024

Tratamientos	Kg/Ha
Bentonita	2280 c [‡]
Biopolímero A (80%)	4015 a
Biopolímero B (100%)	3530 ab
Tierras de Diatomeas	2630 c
Biopolímero A 80% Esterilizado	3630 ab
Biopolímero B 100% Esterilizado	3240 ab
Testigo	2520 c
P	0.0428
R ²	0.66
CV	21.22

Nota. [‡]Valor con diferente letra (abc). Representa diferencias significativas entre tratamientos según la prueba DUNCAN (P<0.05).

CV = coeficiente de variación. R² = ajuste al modelo estadístico

Conclusiones

La aplicación de *Trichoderma harzianum* en formulación con biopolímeros a base de ácidos húmicos y fúlvicos demostró ser eficaz en la estimulación del desarrollo radicular de las plantas de frijol, a la vez incrementando significativamente los parámetros de rendimiento y biomasa.

Recomendaciones

Evaluar la aplicación de los biopolímeros a base de ácidos húmicos y fúlvicos en distintos tipos de cultivo con diferentes condiciones de suelo.

Evaluar la capacidad de los biopolímeros como soporte para diferentes tipos de microorganismos benéficos, incluidos bacterias biocontroladoras y microorganismos inoculantes del suelo, tales como solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno, que puedan contribuir a una fertilización más eficiente y sostenible.

Evaluar el impacto del uso de estas sustancias en la reducción de los costos de producción asociados al consumo de recursos como el agua y los fertilizantes.

Referencias

- Ampong, K., Thilakarathna, M. S. y Gorim, L. Y. (2022). Understanding the Role of Humic Acids on Crop Performance and Soil Health. *Frontiers in Agronomy*, 4, Artículo 848621. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621>
- Bhupenchandra, I., Devi, S. H., Basumatary, A., Dutta, S., Singh, L. K., Kalita, P., Bora, S. S., Devi, S. R., Saikia, A., Sharma, P., Bhagowati, S., Tamuli, B., Dutta, N. y Borah, K. (2020). Biostimulants: Potential and Prospects in Agriculture. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 20–35. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2020/v21i1430244>
- Binsfeld, J. A., Barbieri, A. P. P., Huth, C., Cabrera, I. C. y Henning, L. M. M. (2014). Uso de bioativador, bioestimulante e complexo de nutrientes em sementes de soja. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 88–94. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100010>
- Calvo, P., Nelson, L. y Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1-2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Canellas, L. y Olivares, F [F.] (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3>
- Canellas, L. P., Olivares, F. L [Fábio. L.], Aguiar, N. O [Natália O.], Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P. y Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
- Canellas, P., Balmori, D. M., Médici, L. O., Aguiar, N. O [Natália Oliveira], Campostrini, E., Rosa, R. C. C., Façanha, A. R. y Olivares, F. L [Fábio Lopes] (2013). A combination of humic substances and *Herbaspirillum seropedicae* inoculation enhances the growth of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil*, 366(1-2), 119–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1382-5>
- Drobek, M., Frąc, M. y Cybulska, J. (2019). Plant Biostimulants: Importance of the Quality and Yield of Horticultural Crops and the Improvement of Plant Tolerance to Abiotic Stress—A Review. *Agronomy*, 9(6), 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060335>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Du Jardin, P., Xu, L. y Geelen, D. (2020). Agricultural Functions and Action Mechanisms of Plant Biostimulants (PBs). En D. Geelen y L. Xu (Eds.), *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* (pp. 1–30). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119357254.ch1>
- Fiorentino, N., Ventorino, V., Woo, S. L., Pepe, O., Rosa, A. de, Gioia, L., Romano, I., Lombardi, N., Napolitano, M., Colla, G. y Roupheal, Y. (2018). Trichoderma-Based Biostimulants Modulate Rhizosphere Microbial Populations and Improve N Uptake Efficiency, Yield, and Nutritional Quality of Leafy Vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 9, Artículo 743. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00743>
- Harman, G. E [G. E.] (2000). Myths and Dogmas of Biocontrol Changes in Perceptions Derived from Research on *Trichoderma harzianum* T-22. *Plant Disease*, 84(4), 377–393. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.4.377>

- Harman, G. E [Gary E.], Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I. y Lorito, M. (2004). Trichoderma species — opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I. y Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17–25. <https://doi.org/10.1099/mic.0.052274-0>
- Jesús del Rosario Ruelas-Islas, Luis A. Peinado-Fuentes, Celia S. Romero-Félix, Cándido Mendoza-Pérez, Hernán Celaya-Michel, Pablo Preciado-Rangel, Quintín A. Ayala-Armenta y Fidel Núñez-Ramírez (2023). Role of Bacillus subtilis and phosphorus doses on macronutrient concentration, partitioning and uptake of common bean. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1056>
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R. y Herrera-Estrella, A. (2015). Trichoderma as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae*, 196, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.043>
- Lorito, M. y Woo, S. L. (2015). Trichoderma: A Multi-Purpose Tool for Integrated Pest Management. En B. Lugtenberg (Ed.), *Principles of Plant-Microbe Interactions: Microbes for Sustainable Agriculture* (pp. 345–353). Springer International Publishing; Imprint; Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_36
- Marchuk Larrea, C. N., Benítez Rodas, G. A., Sandoval, W., Arrúa, P., Lopez, H., Guillermo, E., Quintana, S., Fernández, D. y Arrua, A. (2024). Trichoderma as biocontrol agent - in focus. *Revista De La Sociedad Científica Del Paraguay*, 29(1), 137–171. <https://doi.org/10.32480/rscp.2024.29.1.137>
- Martins, E. M., Pillajo, J. Q. y Jones, M. L. (2024). Humic and Fulvic Acids Promote Growth and Flowering in Petunias at Low and Optimal Fertility. *HortScience*, 59(2), 235–244. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17554-23>
- Mylonas, V. A. y McCants, C. B. (1980). Effects of humic and fulvic acids on growth of tobacco. *Plant and Soil*, 54(3), 485–490. <https://doi.org/10.1007/BF02181841>
- Nardi, S., Schiavon, M. y Francioso, O. (2021). Chemical Structure and Biological Activity of Humic Substances Define Their Role as Plant Growth Promoters. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(8). <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO*. openknowledge.fao.org
- Ortiz Enríquez, J. E., Peñuelas-Rubio, O., Argente-Martínez, L., Félix Valencia, P., Padilla Valenzuela, I. y Marroquín Morales, J. Á. (2022). aplicación de bioestimulantes incrementa los componentes del rendimiento de frijol Pinto Bill Z en el sur de Sonora. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 13(2), 371–376. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2846>
- Pire, R. y Pereira, A. (2018). *Tamaño de los poros del suelo y crecimiento de raíz y vástago del chile jalapeño (Capsicum annuum L.)*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952018000500685&script=sci_arttext

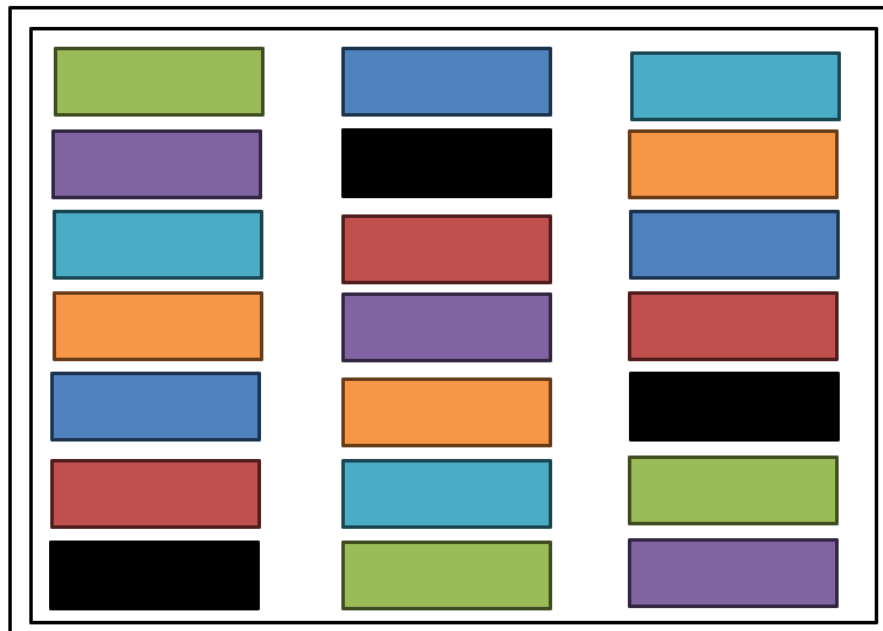
- Shahrajabian, M. H., Chaski, C., Polyzos, N. y Petropoulos, S. A. (2021). Biostimulants Application: A Low Input Cropping Management Tool for Sustainable Farming of Vegetables. *Biomolecules*, 11(5), 698. <https://doi.org/10.3390/biom11050698>
- Valero Valero, N. O., Chima Martínez, K. A. y Gómez Gómez, J. A. (2023). Efecto bioestimulante de una chalcona sintética sobre frijol guajiro (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Bioteología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 21(2), 62–74. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2153>
- Woo, S. L., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., Pascale, A., Lanzuise, S., Manganiello, G. y Lorito, M. (2014). Trichoderma-based Products and their Widespread Use in Agriculture. *The Open Mycology Journal*, 8(1), 71–126. <https://doi.org/10.2174/1874437001408010071>
- Zhang, P., Zhang, H., Wu, G., Chen, X., Gruda, N., Li, X., Dong, J. y Duan, Z. (2021). Dose-Dependent Application of Straw-Derived Fulvic Acid on Yield and Quality of Tomato Plants Grown in a Greenhouse. *Frontiers in Plant Science*, 12, Artículo 736613. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.736613>

Anexos

Anexo A

Cultivo de frijol a los 30 DDS



Anexo B*Distribución de tratamientos por Bloque*

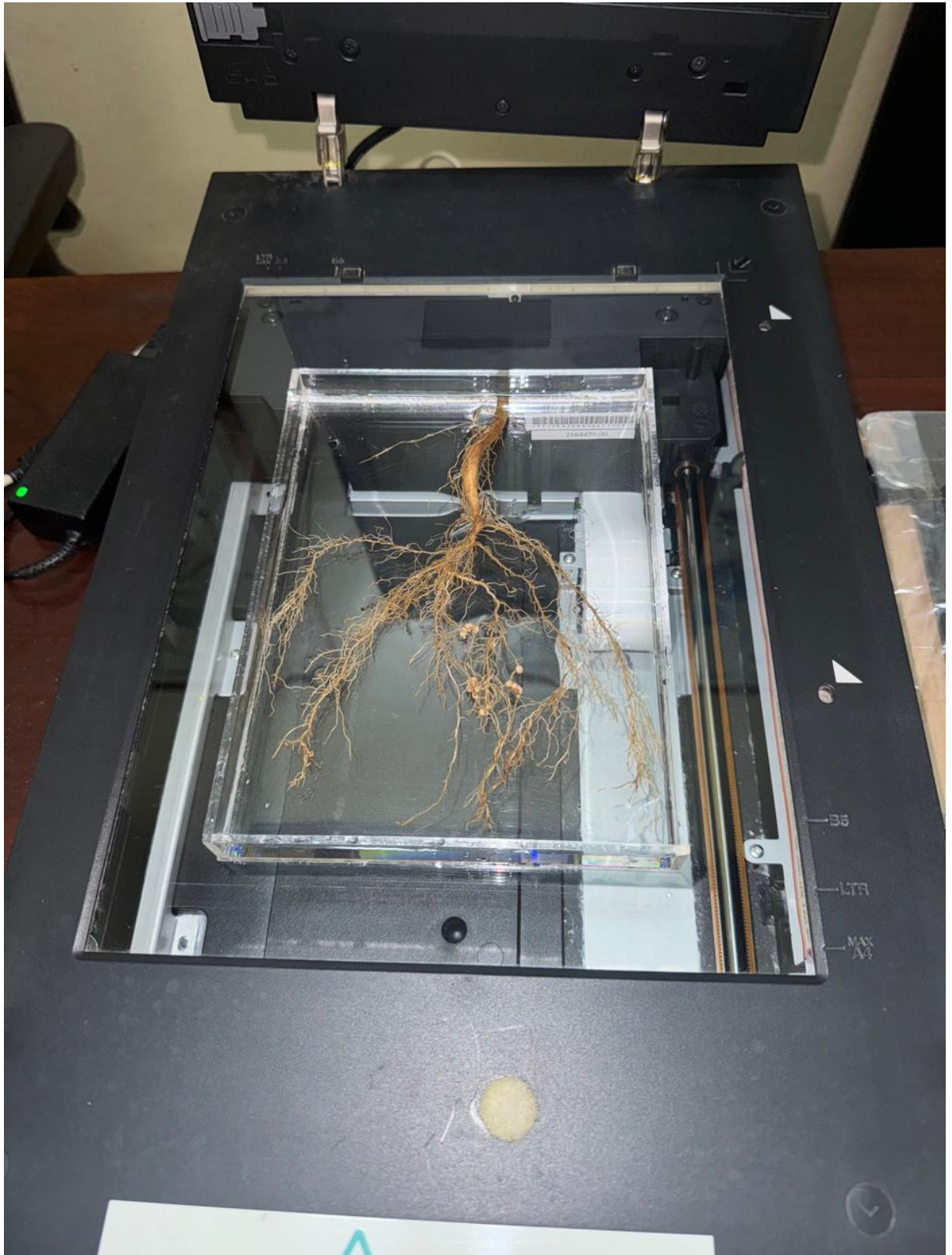
■ T1 ■ T2 ■ T3 ■ T4 ■ T5 ■ T6 ■ T7

Anexo C*Aplicación de tratamientos a loa 15 DDS*

Anexo D*Extracción de plantas a los 30 DDS*

Anexo E

Escaneo de raíz con el escáner Epson Perfection V800



Anexo F

Imagen obtenida por el software WinRHIZO

