



Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

DIRECCIÓN DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

Trabajo de Tesis

Microorganismos como promotores de
crecimiento y rendimiento del cultivo de frijol
común (*Phaseolus vulgaris* L.), El Sauce, León;
2025

Autor

Br. Mario José López Cárdenas

Asesor

MSc. Víctor Hugo Rodríguez Salguera


Presentado a la consideración del Honorable Comité
Evaluador como requisito final para optar al grado de
Ingeniero Agrónomo

Managua, Nicaragua
Enero, 2026

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el Honorable Comité Evaluador designado por la Dirección de Ciencias Agrícolas como requisito final para optar al título profesional de:

Ingeniero Agrónomo

Miembros del Comité Evaluador



MSc. Santos David Romero
Presidente



MSc. Rosario Chavarría Sánchez
Secretario



Ing. Ericka Olmara Cabezas Fonseca
Vocal

Lugar y fecha: Managua, Nicaragua, 25 de noviembre del 2025

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a **Dios** y a la **Virgen santísima**, por darme la vida, la salud, la sabiduría y la fuerza para seguir adelante en cada paso de este camino. Gracias a su guía, he podido superar los momentos difíciles y mantenerme motivado para luchar por mis sueños.

A mis padres, **Evelia del Carmen Cárdenas Matey** y **Mariano de Jesús López Blandón**, quiero agradecer de corazón por su amor incondicional, sus sabios consejos y por estar siempre allí para apoyarme en cada etapa de mi vida. Gracias por entenderme en los momentos complicados y por brindarme siempre los recursos y la energía necesarias para lograr este objetivo. Esta tesis también refleja todo el esfuerzo, sacrificio y fe que han puesto en mí.

A mi tía, **Reyna Isabel López Blandón** y a su hija, muchas gracias por su apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria. Gracias por ofrecerme un hogar, por su generosidad y por recibirme con tanto cariño, como a un hijo más. Su presencia y apoyo fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mis hermanos, **Kevin López**, **Reynaldo López** y **Julio López**, gracias por ser pilar importante en este proceso académico. Gracias por siempre estar allí, por apoyarme sin condiciones y por no dejarme solo, especialmente durante la etapa de campo, cuando su ayuda fue clave para poder realizar esta investigación.

Br. Mario José López Cárdenas

AGRADECIMIENTO

Gracias a **Dios** y a la **Virgen Santísima**, por darme la oportunidad de alcanzar este logro. Me siento agradecido por su sabiduría y protección que me guiaron cada paso de mi camino.

Expreso un agradecimiento especial a mi asesor de tesis, **profesor Víctor Hugo Rodríguez Salguera**, por su invaluable disposición, orientación constante y compromiso durante todo el desarrollo de este trabajo. Su ejemplo de seriedad, responsabilidad y rigor académico ha sido fundamental para fortalecer mi formación profesional y culminar con éxito esta investigación.

A mi **novia**, por su apoyo incondicional, motivación constante y por acompañarme con amor y paciencia en cada etapa de este proceso. También agradezco a mis **amigos** que me colaboraron cuando lo necesité.

A la **Universidad Nacional Agraria (UNA)**, por brindarme una formación integral y por haberme forjado como profesionales comprometidos con el desarrollo agropecuario del país

Quiero agradecer al **Centro Tecnológico Arlen Siu**, en El Sauce, por darme la oportunidad de hacer esta investigación en sus instalaciones.

A todas las personas que, de alguna manera, ayudaron a la realización de este trabajo investigativo.

Br. Mario José López Cárdenas

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
III. MARCO DE REFERENCIA	4
3.1 El frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	4
3.1.1 Importancia socioeconómica en Nicaragua	4
3.1.2 Condiciones climáticas	4
3.1.3 Descripción morfológica	4
3.1.4 Etapas fenológicas	5
3.2 Impacto del cambio climático en la producción de frijol	5
3.2.1 Temperaturas extremas	5
3.2.2 Estrés hídrico	6
3.2.3 Exceso de agua	6
3.3 Microorganismos como promotores de crecimiento	6
3.3.1 Micorrizas arbusculares (HMA)	6
3.3.2 Características taxonómicas de las micorrizas arbusculares.	7
3.3.3 Mecanismos de Simbiosis micorrizas–leguminosa (Frijol)	8
3.3.4 <i>Trichoderma harzianum</i>	9
3.3.5 Características taxonómicas de <i>T. harzianum</i> .	10

3.3.6	Mecanismos de Simbiosis de <i>Trichoderma harzianum</i> –leguminosa (Frijol)	11
3.3.7	<i>Rhizobium</i>	13
3.3.8	Características taxonómicas de <i>Rhizobium</i>	14
3.3.9	Mecanismos de Simbiosis <i>Rhizobium</i> – leguminosa (Frijol)	14
3.4	Evidencia científica sobre inoculación microbiana en frijol	16
3.5	Paquetes utilizados en al análisis estadístico R	18
3.5.1	Afex	18
3.5.2	Readxl	18
3.5.3	Tidyverse	18
3.5.4	Dplyr	19
3.5.5	Imer	19
3.5.6	Emmeans	19
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	20
4.1	Ubicación y fecha del estudio	20
4.2	Diseño experimental	21
4.3	Manejo del ensayo y metodología	22
4.3.1	Preparación del terreno	22
4.3.2	Prueba de germinación	23
4.4	Inoculación de las semillas de frijol	23
4.5	Siembra	24
4.6	Manejo de plagas y enfermedades	24
4.7	Manejo de arvenses	25
4.8	Cosecha	25
4.9	VARIABLES EVALUADAS	26
4.10	VARIABLES DE CRECIMIENTO	26
4.10.1	Altura de planta (cm)	26
4.10.2	Número de hojas trifoliadas	26
4.10.3	Diámetro del tallo (mm)	26
4.11	VARIABLES DE RENDIMIENTO EN PERÍODO DE COSECHA	27
4.11.1	Vainas por planta	27
4.11.2	Número de granos por planta	27
4.11.3	Porcentaje de grano comercializable	27

4.11.4	Rendimiento kg/ha^{-1}	27
4.12	Análisis de datos	27
4.13	Análisis económico	29
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1	Variables de crecimiento	30
5.1.1	Altura de la planta	30
5.1.2	Número de hojas trifoliadas	32
5.1.3	Diámetro del tallo	34
5.2	Variables de rendimiento	37
5.2.1	Vainas por planta	37
5.2.2	Número de granos por planta	39
5.2.3	Porcentaje de grano comercializable	41
5.2.4	Rendimiento en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de frijol producido	43
5.3	Análisis económico	47
5.4	Análisis de dominancia	50
5.5	Tasa de retorno marginal	51
VI.	CONCLUSIONES	53
VII.	RECOMENDACIONES	54
VIII.	LITERATURA CITADA	55
IX.	ANEXOS	68

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
1. Resultados de estudios previos en Nicaragua sobre inoculación microbiana en frijol.	16
2. Descripción de los tratamientos evaluado en el cultivo de frijol.	22
3. Dosis de microorganismos utilizadas para la inoculación de las semillas de frijol en cada tratamiento evaluado.	24
4. Requerimientos hídricos (mm) por etapa fenológica del cultivo de frijol.	46
5. Presupuesto parcial estimado de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).	49
6. Análisis de dominancia de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).	51
7. Tasa de Retorno Marginal de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).	52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Morfología de una planta de frijol.	5
2. Simbiosis de las Micorrizas arbusculares con una planta de frijol.	9
3. Simbiosis del hongo <i>Trichoderma harzianum</i> con una planta de frijol.	13
4. Simbiosis de la bacteria <i>Rhizobium</i> con una planta de frijol.	16
5. Ubicación geográfica donde se realizó el ensayo.	20
6. Comparación de la altura de la planta (cm) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.	32
7. Comparación del número de hojas trifoliadas (promedio) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.	34
8. Comparación del diámetro del tallo (mm) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.	37
9. Comparación del número de vainas por planta por cada tratamiento evaluado.	39
10. Comparación del número de granos por planta por cada tratamiento evaluado.	41
11. Comparación del porcentaje de grano comercializable por cada tratamiento evaluado	43
12. Comparación del rendimiento de grano kg/ha ⁻¹ por cada tratamiento evaluado.	45
13. Temperaturas máximas y precipitaciones registradas durante el ensayo del cultivo de frijol en El Sauce, León.	47

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS	PÁGINA
1. Plano de campo.	68
2. Preparación del terreno para establecimiento del cultivo de frijol.	69
3. Delimitación de bloques y parcelas para establecimiento del cultivo de frijol	69
4. Pesado e inoculación de la semilla de frijol para establecimiento en campo	69
5. Toma de datos de las variables de crecimiento.	70
6. Cosecha de las plantas cuando alcanzaron su madurez fisiológica.	70
7. Toma de datos de las variables de rendimiento.	71
8. Vista del experimento en crecimiento y desarrollo del cultivo.	71

RESUMEN

El cambio climático limita cada vez más la productividad del cultivo de frijol, afectando su desarrollo y crecimiento debido a temperaturas extremas, lluvias irregulares y estrés hídrico. Ante este escenario, microorganismos benéficos como *Rhizobium*, hongos micorrízicos y *Trichoderma harzianum* ofrecen soluciones sostenibles al mejorar la nutrición, inducir tolerancia al estrés y proteger contra fitopatógenos. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue, evaluar estas alternativas biológicas y ofrecer una recomendación técnica para pequeños productores de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) del municipio de El Sauce, León. El estudio se realizó en el Centro Tecnológico CETA Arlen Siu, El Sauce, durante los meses de junio y julio del año 2025. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones o bloques. Se evaluaron variables de crecimiento (altura de la planta, número de hojas trifoliadas y diámetro del tallo) y rendimiento (número de vainas por planta, número de granos por planta, porcentaje de grano comercializable y rendimiento en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Los efectos de los tratamientos en las variables de crecimiento se determinaron a través de un análisis de varianza de medidas repetidas. Mientras que en las variables de rendimiento se empleó un modelo lineal mixto; así mismo, se hicieron comparaciones de medias mediante la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) de Tukey. El análisis estadístico evidenció diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre el testigo y los microorganismos inoculados, y entre estos últimos; *Trichoderma*, se diferenció de los otros microorganismos y consorcios en las variables de crecimiento. Micorriza+*Rhizobium* se diferenció del testigo y *Trichoderma* al presentar más altura, hojas y diámetro. En rendimiento *Rhizobium*+*Trichoderma* alcanzó el valor más alto ($1,057 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), seguido por Micorriza ($1,017 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), ambos superiores al testigo y a *Trichoderma*. El análisis económico reveló que Micorriza y *Rhizobium*+*Trichoderma* fueron las opciones más rentables, con tasas de retorno marginal de C\$ 81.62 y C\$ 0.67 por cada córdoba invertido respectivamente. Estos resultados confirman que la inoculación microbiana mejora el crecimiento y el rendimiento del frijol, constituyendo una alternativa biológica sostenible y económicamente viable para enfrentar los efectos del cambio climático para pequeños productores de este rubro.

Palabras clave: microorganismos benéficos, micorrizas arbusculares, *Rhizobium*, *Trichoderma harzianum*, inoculación, agricultura sostenible

ABSTRACT

Climate change increasingly limits crop productivity, affecting their development and growth due to extreme temperatures, irregular rainfall, and water stress. Beneficial microorganisms such as *Rhizobium*, mycorrhizal fungi, and *Trichoderma harzianum* offer sustainable solutions by enhancing nutrient uptake, inducing stress tolerance, and protecting against phytopathogens. This study aimed to evaluate these biological alternatives and provide technical recommendations for small-scale bean (*Phaseolus vulgaris* L.) producers in the municipality of El Sauce, León. The experiment was conducted at the CETA Arlen Siu Technological Center during June and July of 2025, using a randomized complete block design with eight treatments and four replications. Growth variables (plant height, number of trifoliolate leaves, and stem diameter) and yield variables (pods per plant, grains per plant, percentage of marketable grain, and yield in $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) were evaluated. Treatment effects on growth variables were analyzed through repeated-measures ANOVA, while yield variables were evaluated with a mixed lineal model; mean comparisons employed Tukey's honest significant differences test. Results revealed significant differences ($p < 0.0001$) between the control and the inoculated microorganisms, and among inoculants. *Trichoderma* differed from other microorganisms and consortia in growth variables, whereas Micorriza+*Rhizobium* showed superior plant height, leaf number and stem diameter compared to the control and *Trichoderma*. For yield, *Rhizobium*+*Trichoderma* achieved the highest value ($1,057 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), followed by Micorriza ($1,017 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), both outperforming the control and *Trichoderma* alone. Economic analysis indicted Micorriza and *Rhizobium*+*Trichoderma* as the most profitable options, with marginal rates of return of C\$ 81.62 and C\$ 0.67 per Córdoba invested, respectively. These findings confirm that microbial inoculation enhances bean growth and yield, representing a sustainable and economically viable biological alternative for small-scale bean producers to mitigate climate change impacts.

Key words: beneficial microorganisms, arbuscular mycorrhizae, *Rhizobium*, *Trichoderma harzianum*, inoculation, sustainable agriculture

I. INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos alimenticios más importante en América Latina, tanto por su aporte nutricional como por su relevancia socioeconómica. En Nicaragua, constituye un alimento básico y una fuente de ingresos esenciales para pequeños productores rurales (Solís, 2017). Durante el ciclo 2022/2023, la producción nacional alcanzó los 4.8 millones de quintales, cultivados en un área de 344.1 mil manzanas, con un rendimiento promedio de 14.1 quintales por manzanas (Banco Central de Nicaragua [BCN], 2025).

Este rubro genera más de 200 mil empleos directos e indirectos y un aporte del 0.79% al BIP (Torres, 2023). Sin embargo, la producción de frijol enfrenta limitaciones crecientes debido a prácticas agrícolas intensivas, agotamiento de nutrientes del suelo, uso indiscriminado de agroquímicos y los efectos del cambio climático. Este último, se manifiesta por temperaturas extremas, lluvias irregulares y estrés hídrico, condiciones que afectan negativamente el crecimiento vegetal, bajos rendimientos y pérdidas en la producción, amenazando la sustentabilidad de los sistemas productivos de los pequeños productores (Villatoro et al., 2022).

A estos desafíos se suman las dificultades económicas derivadas de las fluctuaciones en los precios de insumos agrícolas como plaguicidas y fertilizante sintético. El uso intensivo y prolongado de estos productos ha generados impactos negativos, entre lo que se destacan la creciente dependencia de estos insumos para mantener la productividad, degradación de los suelos, contaminación de cuerpos de agua, pérdidas de biodiversidad y riesgos en la salud humana (Monzón et al., 2023).

En este contexto, los microorganismos benéficos del suelo, como *Rhizobium spp*, hongos micorrízicos y *Trichoderma harzianum*, han demostrado su potencial como promotores del crecimiento vegetal, al facilitar la disponibilidad de nutrientes, inducir tolerancia al estrés, protección contra fitopatógenos y mejorar el rendimiento de los cultivos de manera sostenible (Polanco y Vanegas, 2023).

Diversos estudios respaldan la efectividad de estos microorganismos, González et al. (2012) reportaron un aumento en las variables de crecimiento, desarrollo y rendimiento con el uso de micorrizas y *Rhizobium* en frijol, demostrando un impacto positivo en la inoculación. Por otra

parte, González et al. (2019) en su estudio obtuvieron un incremento en la germinación y crecimientos de las plantas de frijol utilizando *Trichoderma harzianum*.

Hongos como *Fusarium spp*, *Pythium spp*, *Rhizoctonia spp*, *Verticillium spp* y *Sclerotium spp*; que atacan al cultivo de frijol, pueden ser contrarrestados con estos microorganismos. Un estudio realizado por Medina et al., (2023) reportaron un manejo eficiente de estos patógenos usando micorrizas más *T. harzianum*.

Asimismo, Ramírez y Rodríguez, (2012) mencionan la tolerancia y resistencia de las plantas a estrés abiótico y biótico por el uso de micorrizas. Mientras que, Andrade et al., (2023) reportaron resultados similares con la aplicación de *T. harzianum*. Por su parte, Villanueva, (2021) resalta el potencial de las *Rhizobium* para reducir el estrés por sequía en leguminosas, evidenciando el papel clave que estos microorganismos representan para la resiliencia de los sistemas agrícolas.

Esta problemática adquiere especial relevancia en el municipio de El Sauce, ubicado en el corredor seco centroamericano, donde la producción de frijol constituye la principal actividad agrícola y fuente de ingreso para una cantidad considerable de pequeños productores de este rubro. Las condiciones climáticas adversas, caracterizadas por sequías prolongadas y lluvias irregulares, amenazan la estabilidad productiva de estos agroecosistemas. Por ello, resulta fundamental evaluar el efecto de estos microorganismos y su respuesta agronómica en el frijol, bajo condiciones locales, ya que, a pesar de la evidencia científica existente sobre las bondades de estas tecnologías, persiste un vacío en su validación en esta región, lo que limita su adopción como alternativa sostenible.

Por lo anterior, esta investigación se propuso evaluar el efecto de diferentes consorcios microbianos sobre el crecimiento y rendimiento del frijol común, de la variedad criolla cuarentano, con el objetivo de identificar alternativas biológicas viables que contribuyan a una agricultura más sostenible y resiliente a los actuales escenarios de cambio climático que enfrentan los pequeños productores del municipio de El Sauce.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar alternativas biológicas sostenibles que mejoren el crecimiento, rendimiento y rentabilidad del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones del municipio de El Sauce, León.

2.2 Objetivos específicos

Identificar el efecto de la inoculación de *Rhizobium*, Micorriza y *Trichoderma harzianum* sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo estudiado.

Determinar la rentabilidad de los tratamientos evaluados mediante el análisis de presupuesto parcial, análisis de dominancia y tasa de retorno marginal.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

3.1.1 Importancia socioeconómica en Nicaragua

El frijol constituye la principal fuente de proteínas vegetales de la población nicaragüense al aportar 22.3% de proteínas, 7.9% de hierro y 2.2% de vitaminas (Icabalceta et al., 2023). Durante el ciclo productivo 2022-2023 se alcanzó una producción de 4.8 millones de quintales, lo que significó un incremento de 100,000 quintales respecto al ciclo anterior; según el estudio de Achicanoy et al., (2024), el consumo aparente interno representa el 19% de la producción total, con un consumo per cápita de 20 kg por persona al año.

Estos mismos autores señalan que la oferta exportable de Nicaragua hacia los países centroamericanos se destinó hacia Costa Rica 37%, El Salvador 36%, Honduras 23% y Guatemala 4%, consolidando al país como proveedor regional y reflejando un índice de autosuficiencia de 153%, que confirma la capacidad productiva nacional para garantizar la seguridad alimentaria y generar divisas mediante el comercio exterior.

3.1.2 Condiciones climáticas

El cultivo de frijol requiere entre 300 y 400 mm de agua durante su ciclo vegetativo, siendo las etapas de floración y llenado de vainas las más sensible al déficit hídrico. Su rango térmico óptimo se sitúa entre 20°C y 25°C, aunque tolera mínimas de 18°C y máximas de hasta 28°C. Además, esta especie muestra buena adaptabilidad altitudinal, estableciéndose eficazmente entre los 200 y 1500 msnm (Gómez et al., 2024).

3.1.3 Descripción morfológica

El frijol es una planta anual de rápido crecimiento, caracterizada por un sistema radicular poco profundo, compuesta por raíces secundarias ramificadas. Presenta un tallo herbáceo que puede alcanzar más de un metro de altura. Sus hojas son simples y compuestas, de forma lanceolada y ápice agudo. Las flores, son de colores variados, se agrupan en racimos compuestos por 4 a 8 unidades. El fruto es una vaina que varía en color, forma y tamaño, y contiene entre 4 a 7 semillas. Estas son de forma oblonga, con una longitud de 1 a 2 cm y coloración diversa (Medina, 2022).

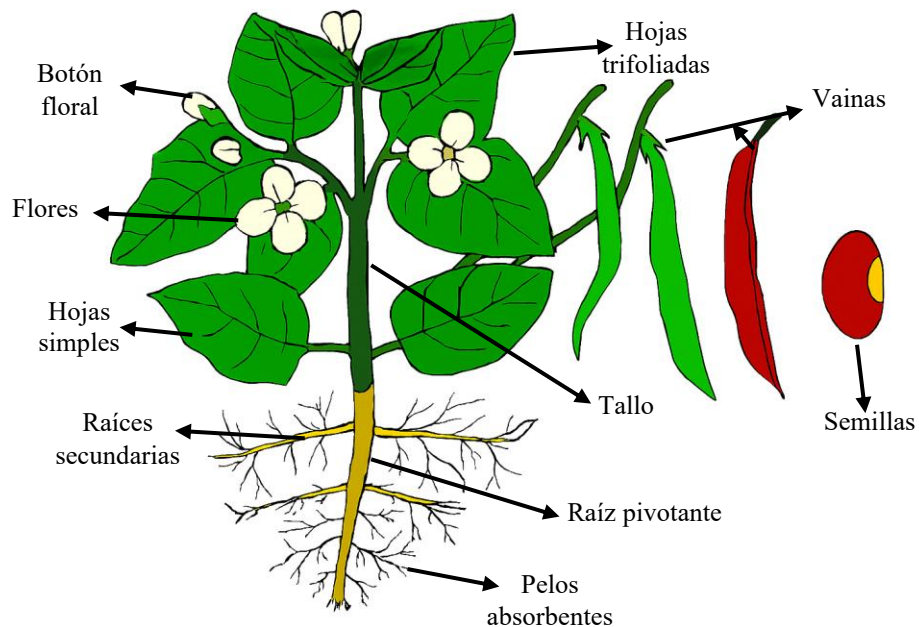


Figura 1. Morfología de una planta de frijol.

3.1.4 Etapas fenológicas

El desarrollo de la planta se estructura en dos grandes fases fenológicas: vegetativa y reproductiva.

En la fase vegetativa ocurren las siguientes etapas: V0, V1, V2, V3 y V4, en estos procesos empieza la absorción de agua, nutrientes y división de células que dan lugar a la formación de cotiledones y se extienden las hojas primarias. Posteriormente, se forma el desarrollo vegetativo de la planta formando tallo, ramas y hojas trifoliadas. En la fase reproductiva se desarrollan las etapas R5 a R9, iniciando con la formación de racimos florales. La planta presenta su primera flor abierta, lo que da paso a la formación de vainas y al crecimiento de las semillas (Espinoza y Castillo, 2024).

3.2 Impacto del cambio climático en la producción de frijol

3.2.1 Temperaturas extremas

Según López et al., (2021), en el cultivo de frijol temperaturas superiores a 30°C reducen significativamente la capacidad productiva del cultivo, generando una disminución en la floración, caída masiva de botones florales, flores y vainas, así como esterilidad en las plantas, lo que afecta negativamente el rendimiento. Además, el estrés térmico provocado por estas

condiciones induce una desaceleración en el crecimiento, afectando el desarrollo vegetativo y la acumulación de biomasa.

3.2.2 Estrés hídrico

Polón et al., (2017) señalan que aproximadamente el 60% de la producción mundial de frijol ocurre bajo condiciones de déficit hídrico, siendo este uno de los factores más determinante en la reducción del rendimiento, después de las enfermedades. Estudios posteriores confirman que el estrés hídrico en este cultivo afecta procesos fisiológicos claves, como la fotosíntesis y la transpiración (Montero et al., 2019). Además de limitar la formación de vainas y el llenado de granos (Reyes et al., 2014), lo que repercute directamente en la productividad del cultivo.

3.2.3 Exceso de agua

Berrios y Carvajal., (2005) señalan que el cultivo de frijol es sensible al exceso de agua en el suelo, ya que esta condición reduce la disponibilidad de oxígeno en los poros del suelo, lo que limita el intercambio gaseoso en las raíces. Esta condición puede comprometer el funcionamiento del sistema radicular y en casos severos, la muerte por asfixia radicular. Por otra parte, Flores et al., (2019) advierten que, en ambientes tropicales húmedos, el desequilibrio hídrico puede alterar la fisiología del cultivo, afectando su desarrollo y rendimiento.

3.3 Microorganismos como promotores de crecimiento

3.3.1 Micorrizas arbusculares (HMA)

Constituye una asociación simbiótica entre el hongo y las raíces de las plantas, la relación es caracterizada por la capacidad del hongo en desarrollar hifas extrarradicales, que exploran el suelo en busca de nutrientes e intrarradicales, que colonizan la corteza de la raíz de manera intracelular. La colonización se da por estructuras especializadas llamadas arbusculos, estos funcionan como órgano de intercambio de nutrientes entre el hongo y la célula de la planta (Aguilera et al., 2007).

Además, los hongos micorrízicos pueden formar otro tipo de estructura denominada vesículas, formaciones intercelulares ubicada en la corteza radicular, compuesta principalmente por lípidos y actúan como reservorios de nutrimentos, permitiendo al hongo almacenar compuestos

energéticos, que pueden ser utilizados en condiciones desfavorable especialmente cuando la planta no le suministra azúcares derivados de la fotosíntesis (Sáenz, 2002).

Como parte de esta interacción simbiótica, las hifas tienen la capacidad de explorar zonas del suelo inaccesibles para los pelos radiculares de la planta, lo que permite una absorción mayor de nutrientes. Se ha documentado que esta simbiosis puede contribuir a la absorción de hasta 80% de fósforo (P), 10% de potasio (K), 25% de zinc (Zn), 60% de cobre (Cu) y 25% de nitrógeno (N) (Delgado, 2022). Estas funciones se dan cuando el micelio del hongo complementa los pelos radiculares de la planta (Franken et al., 2007).

3.3.2 Características taxonómicas de las micorrizas arbusculares.

Se encuentran dentro del **Reino: Fungi** debido que es un hongo donde las células tienen una pared celular hecha de quitinas, se reproduce a través de esporas, formando hifas y filamentos para formar un micelio, lo que permite la colonización de las raíces de las plantas. Además, no pueden producir su propio alimento, por tanto, deben realizar simbiosis con las plantas para poder alimentarse (Molina, 2023).

Dentro de la **División: Glomeromycota** a la cual pertenecen organismos multicelulares formadores de hifas no septadas (cenocitos) que pueden crecer dentro de las células de la raíz (intracelulares) o entre ellas (intercelulares). Las hifas pueden penetrar las células corticales de las raíces y formar arbusculos. Estos arbusculos están formados por un haustorio muy ramificado que se desarrolla dentro de las células de las raíces y tienen la capacidad de intercambiar nutrientes entre planta y hongo (Jiménez et al., 2011).

En la **Clase: Glomeromycetes** que se caracteriza por ser simbiote mutualista de las plantas. El hongo posee un aparato que penetra el interior de las células de la raíz de las plantas, formando vesículas alimenticias para el hongo (Salmerón et al., 2015).

Dentro del **Orden: Glomerales** que son mutualista biotróficos, formando micorrizas arbusculares para intercambiar nutrientes con las plantas, producen grandes esporas (zigosporas y clamidosporas) con miles de núcleos llamados glomales (Alves et al., 2011).

En la **Familia: Glomeraceae** que se caracteriza por poseer molécula, célula y enzima que constituye la acumulación y transporte de nutrientes en su forma química, capaces de formar

asociaciones benéficas donde el hongo a su vez recibe de la planta moléculas de carbono y ácidos grasos para sus funciones vitales de sobrevivencia (Schubler y Walker, 2010).

3.3.3 Mecanismos de Simbiosis micorrizas–leguminosa (Frijol)

El proceso inicia con la liberación de metabolitos secundarios y hormonas de las plantas hacia la rizosfera. Es ahí donde las moléculas llamadas lactonas terpenoides como las estrigolactonas, son derivados del metabolismo de los carotenoides, que hacen que los HMA sean atraídos hacia las raíces de las plantas (López y Rodríguez, 2021).

Posteriormente, el hongo reconoce la señal química (estrigolactona), para iniciar un proceso molecular llamado transcripción, donde, la información genética contenida en el ADN del hongo, se transcribe a ARN mensajero proveniente de los genes de micorrización (genes Myc).

Durante este proceso, la traducción (el ARN se traduce a proteínas) de los genes Myc, dan origen a proteínas que trabajan de manera coordinada para sintetizar y secretar los llamados factores de micorrización. Estos factores están modificados químicamente y permite establecer la simbiosis micorrícica arbuscular con las planta (Schmitz y Harrison, 2014).

A continuación, se dá el reconocimiento molecular que ocurre entre ambos simbióticos, los HMA forman estructuras de unión llamados apresorios (estructura fúngica hinchada que se adhiere a la planta), dichas estructuras permiten un acercamiento y adherencia en la capa celular (epidermis) de la raíz más externa. Posterior a eso, se genera una estructura llamada aparato de pre-penetración (Choi et al., 2018).

El aparato de pre-penetración, es una estructura tubular (similar a un túnel) que se forma con el material de la pared de las células de la raíz, previniendo así, que el hongo interactúe directamente con el citoplasma de la célula vegetal, esto evita la respuesta de defensa de las plantas hacia el hospedante. Así, una única hifa del hongo se desplaza dentro del aparato de penetración en dirección hacia las células más internas de la raíz, llamada células del córtex (Sarmiento et al., 2021).

Después que el hongo se encuentra dentro de la célula vegetal, sufren diversos cambios morfológicos. En estos cambios incluyen un aumento en el tamaño de las células, la reorganización, compactación de sus organelos (Maclean et al., 2017).

Por último, las hifas se desplaza internamente en las raíces para formar dos tipos de estructura, una denominada arbusculos, la cual se origina cerca del cilindro vascular de las plantas mediante numerosas ramificaciones dicotómicas sucesivas de una hifa, y tiene la función de transferir nutrimentos que el micelio del hongo captura en la superficie. La segunda estructura es llamada vesícula, es de forma ovalada a esférica; puede formarse entre o dentro de las células radicales, y su función es resguardar nutrientes para el hongo (Andrade, 2010). La figura dos, de elaboración propia, resume todo el proceso anteriormente descrito.

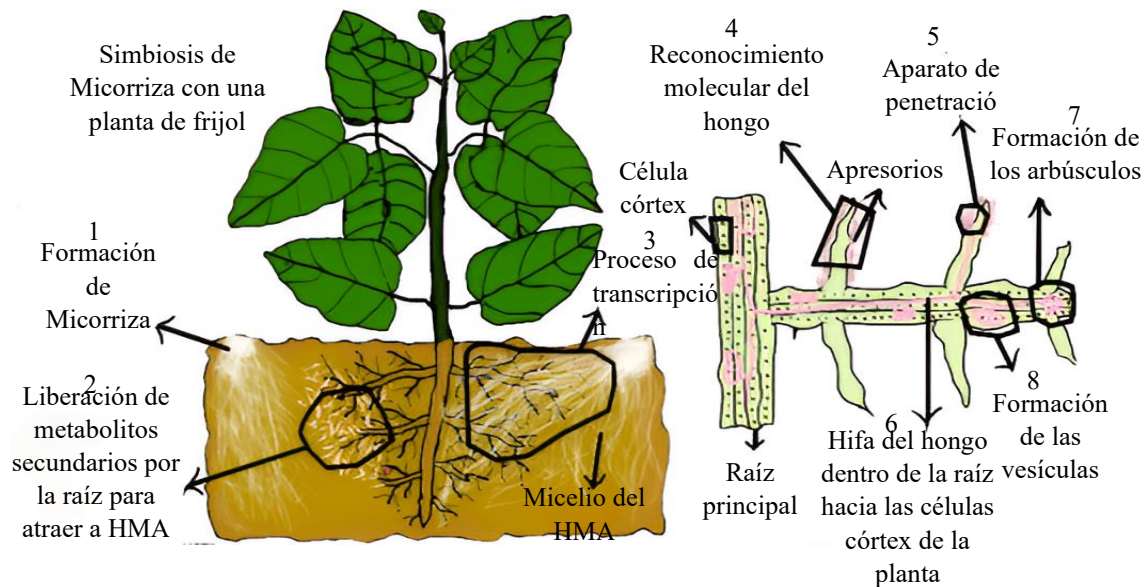


Figura 2. Simbiosis de las micorrizas arbusculares con una planta de frijol.

3.3.4 Características taxonómicas y relación simbiótica *T. harzianum*

Es un hongo cosmopolita presente de forma natural en el suelo, que establece relaciones simbióticas con las plantas, beneficiando los cultivos mediante la solubilización de nutrientes y la tolerancia al estrés abiótico y biótico. Su principal impacto radica en la supresión de fitopatógenos a través de parasitismo y la antibiosis, además, actúa como organismo oportunista, compitiendo por espacio y nutrientes en el suelo con los fitopatógenos. Este hongo puede interferir en la respiración de patógenos mediante la producción de metabolitos como el cianuro de hidrógeno, amoníaco y dióxido de carbono. Por ende, contribuye al mantenimiento de la porosidad del suelo, evitando su bloqueo fisicoquímico (Flores et al., 2022).

Este género fúngico, se encuentra ampliamente distribuido en suelos de todas las zonas climáticas. Su rol ecológico como descomponedor de residuos leñosos y herbáceos le permite intervenir activamente en la rizosfera del suelo, Se distingue por su carácter invasor y rápido crecimiento gracias a su eficiencia en la asimilación de sustratos y a la producción de compuestos microbiano. Además, secreta enzimas hidrolíticas como celulasas, quitinasas y glucanasas, capaces de degradar la pared celular de otros hongos, lo que refuerza su capacidad competitiva y su potencial como agente de supresor de enfermedades (Verma et al., 2007).

3.3.5 Características taxonómicas de *T. harzianum*.

Se encuentra dentro del **Reino: Fungi** característico por su comportamiento oportunista, su capacidad de establecer simbiosis con plantas y su acción como micoparasitismo, posee una alta capacidad reproductiva en condiciones favorables, sin embargo, puede adaptarse y sobrevivir en condiciones extremas de temperatura, salinidad y pH ácidos o alcalinos (Alarcón et al., 2009).

Dentro de la **División: Eumycota** tiene la capacidad de crecer en los espacios porosos del suelo, donde se establece estratégicamente para acceder a nutrientes disponibles. Su forma de alimentación es por absorción, un proceso mediante el cual capta compuestos orgánicos e inorgánicos directamente desde el entorno, a través de su red de hifas. Esta estrategia le permite aprovechar eficientemente los recursos del suelo, incluso en condiciones limitantes (Gallego, 2016).

En la **Clase: Euascomycetes** las características que lo atribuyen son, presentan peritecios inmerso-turbinados de colores marrones a negros, tiene la capacidad de estar en el tejido del huésped durante mucho tiempo sin causar ningún tipo de síntoma o daño a través del estado asexual y se hospeda en tejido sano donde llevan a cabo su ciclo (Barbosa et al., 2020).

En el **Orden: Hypocreales** se caracteriza por presentar peritecios solitarios, estos crecen en estromas de colores brillantes, blancos, verdosos y raras veces negruzcos. Por otra parte, las ascosporas son hialinas, amarillentas o verdes (Valenzuela et al., 2017).

Dentro de la **Familia: Hypocreaceae** son reconocidas por sus ascomas periteciales de colores brillantes, además, que pueden encontrarse en la vegetación donde actúa como defensa contra patógenos o amenazas externas (Talavera et al., 2020).

3.3.6 Mecanismos de Simbiosis de *T. harzianum*–leguminosa (Frijol)

Según Murillo et al. (2022), en su estudio sobre el uso de *T. harzianum* en el cultivo de frijol, se describe la simbiosis funcional entre la planta y el hongo.

En el caso del frijol común, la colonización del sistema radicular es fundamental para la protección de las plantas y la prevención de ataques de enfermedades causantes de pudriciones en raíces y tallo. Además, de la inducción de resistencia sistémica y crecimiento vegetativo (Hoyos et al., 2009).

Esta resistencia se produce mediante cambios morfológicos y bioquímicos en la planta, que conducen a la activación de sus mecanismos de defensa frente a diversos fitopatógenos, produciéndose cambios en la microflora de las raíces, mejorando la absorción de nutrientes como el nitrógeno y facilitando la solubilización de elementos esenciales presentes en el suelo (Harman et al., 2004).

El proceso inicia cuando el hongo compite por el espacio disponible en el suelo, colonizando activamente los poros con una alta velocidad de crecimiento y abundante esporulación, especialmente en zonas con presencia de patógenos. Durante esta etapa, el hongo segrega metabolitos secundarios en bajas concentraciones que actúan como patrones moleculares asociados a microorganismos. Estos compuestos son reconocidos por la planta, lo que desencadena una serie de señalización mediada por el ácido jasmónico y el etileno (Fernandez, 2001).

Posteriormente, el micoparasitismo crece quimiotrópicamente hacia el hospedante, este se adhiere a las hifas del patógeno, enrollándose en ellas y en ocasiones penetra las hifas del agente infeccioso. Sin embargo, la degradación de las paredes celulares del hospedante la podemos observar en los estados tardíos del proceso parasítico, al ocurrir este proceso conlleva al debilitamiento casi total del fitopatógeno (Hernandez et al., 2019).

A continuación, se da el crecimiento quimiotrófico donde ocurre la localización del hospedante, es ahí que *T. harzianum* puede detectar a distancia al patógeno y las hifas crecen en dirección al agente dañino como respuesta a un estímulo químico (Izurieta, 2021).

Posteriormente, el reconocimiento se realiza mediante interacciones de lectina-carbohidrato, donde las lectinas son proteínas transportadoras de azúcares o glicoproteínas que se unen a las células y participan en las interacciones entre los componentes de la superficie celular y su entorno extracelular, es por eso, que la producción de lectinas está involucrada en el micoparasitismo (Espinoza, 2013).

Después se da la adhesión y enrollamiento de las hifas que adhieren a las del hospedante mediante la formación de estructuras parecidas a ganchos y apresorios que se enrollan alrededor de estas, esta fase está mediado por procesos enzimáticos. Sin embargo, la adherencia de las hifas de *T. harzianum* ocurre gracias a la asociación de un azúcar (N-acetilglucosamina) de la pared del antagonista con una lectina (galactosa o manosa) presente en la pared del patógeno (Hidalgo y Moran, 2020).

Luego se da la actividad lítica donde se producen enzimas líticas extracelulares, estas enzimas son; quitinasas, glucanasas, celulasas, lipasas y proteasas, que degradan las paredes celulares del hospedante y posibilitan la penetración de las hifas del antagonista, esto se debe a los puntos de contacto donde se produce la lisis y aparecen los orificios, para después penetrar la hifa del micoparásitos en las del hongo hospedante (Paredes et al., 2011).

Por último, se presenta la antibiosis, que consiste en producción de metabolitos secundarios volátiles y no volátiles, estos metabolitos inhiben el desarrollo de otros microorganismos con los que no hacen contacto físico el hongo. Es por eso, que las sustancias inhibidoras son consideradas antibióticos, las cuales son; trichodermina, suzukacilina, alameticina, dermadina, trichotecenos y trichorzianina, que al ser segregadas funcionan como sustancias nocivas para otros patógenos que compiten con ellos (Infante et al., 2009). En la siguiente figura se trata de deresumir este proceso antagónico del hongo.

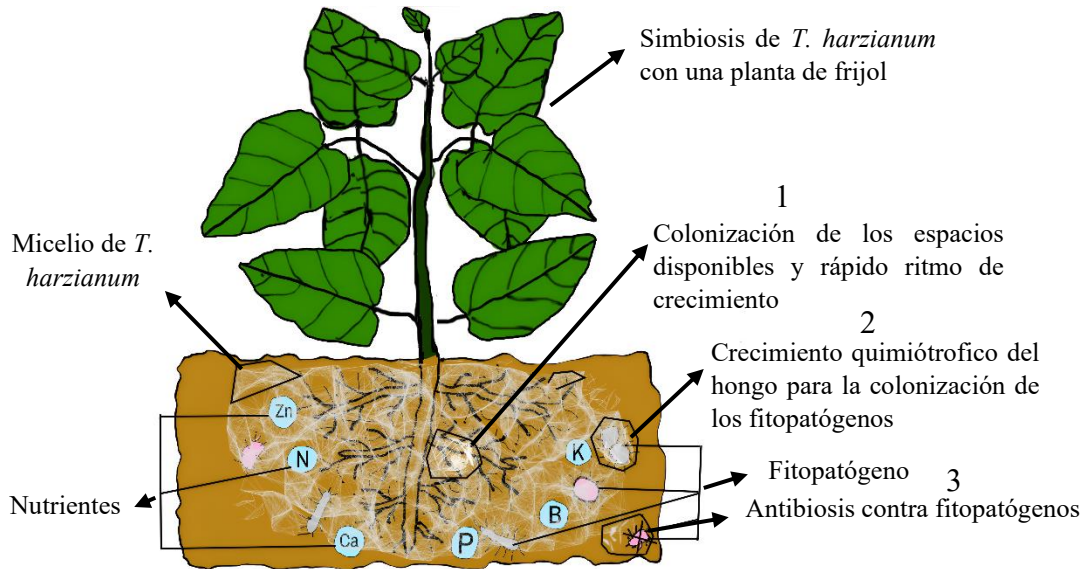


Figura 3. Simbiosis del hongo *Trichoderma harzianum* con una planta de frijol. Fuente: Elaboración propia.

3.3.7 Características taxonómicas y proceso de simbiosis de *Rhizobium*

Las bacterias del género *Rhizobium* tienen la capacidad de captar nitrógeno atmosférico y transferirlo a las raíces de las plantas, donde puede ser aprovechado como fuente de fertilización nitrogenada. Parte de este nitrógeno también se fija en el suelo, contribuyendo a su enriquecimiento. La simbiosis entre *Rhizobium* y leguminosas ocurre de forma natural en los campos agrícolas, y constituye un mecanismo biológico clave para la nutrición vegetal (Villatoro et al., 2016).

Además de la capacidad de captación de nitrógeno atmosférico (N_2) por *Rhizobium*, también tiene la capacidad de convertirlo en amonio (NH_4^+), una forma asimilable para las plantas. Esta interacción inicia cuando las raíces de las leguminosas liberan compuestos señalizadores como los isoflavonoides, que inducen la formación de nódulos radiculares, estructuras especializadas donde se alojan las bacterias del género *Rhizobium*. Para que la fijación de nitrógeno sea eficiente, los nódulos deben ser de tamaño grande, estar ubicados en la parte superior de las raíces y presentar una coloración rosada en su interior, indicativo de la presencia activa de leghemoglobina, proteína esencial para la captura y transformación del nitrógeno atmosférico (Ferguson et al., 2020).

3.3.8 Características taxonómicas de *Rhizobium*

Se encuentran dentro del **Reino: Monera** porque son microorganismos procariotas que presentan tamaños de unos pocos micrómetros y diversas formas, las formaciones más comunes son; esferas (cocos), barras (bacilos), filamentos curvados (vibrios) y helicoidales (espirilos y espiroquetas). Además, de ser células procariotas que posee una pared celular compuestas de peptidoglicano (Castillo, 2016).

Pertenece a la **División: Proteobacteria** por ser bacterias de vida libre que tienen la capacidad de fijar de nitrógeno con las leguminosas, estas son gramnegativas con una pared celular formada principalmente de lipopolisacáridos y su forma de traslado es por flagelos, sin embargo, algunas lo pueden hacer por deslizamiento bacterial (Pinzón, 2019).

En la **Clase: Alphaproteobacteria** su ciclo de vida se desarrolla a partir de su capacidad para habitar en el interior de células eucariotas huésped, estableciendo relaciones endosimbióticas dentro de los nódulos radiculares de las plantas, particularmente en asociación con especies de leguminosas. (Murali y Maheshwari, 2023).

Dentro del **Orden Rhizobiales** es un orden de proteobacterias alfa capaces de establecer relaciones simbióticas con otros organismos y beneficiar al huésped (Masson y Batut, 2009).

En la **Familia: Rhizobiaceae** incluyen a muchas de las especies de rizobios, como las parásitas de plantas, incluyendo la agrobacterium (Marcaondes, 2014).

3.3.9 Mecanismos de Simbiosis *Rhizobium* – leguminosa (Frijol)

El proceso inicia con el reconocimiento en las raíces de las leguminosas, las cuales segregan materiales orgánicos que estimulan el crecimiento microbiano en la rizosfera. Este estímulo favorece la interacción con *Rhizobium*, cuya adherencia a los pelos radicales está mediada por la ricadesina, una proteína específica presente en la superficie de esta bacteria. El proceso continúa cuando la ricadesina se une a los complejos de calcio que se encuentran en la superficie de los pelos radicales. Sin embargo, existen otras sustancias que forman parte en esta adherencia planta-bacteria, por ejemplo, las lectinas, que se unen a distintos oligosacáridos de la superficie bacteriana (Nápoles et al., 2016).

Posteriormente se da la excreción de los factores nod por la bacteria, donde las células penetran el pelo radical por su extremo y excreta una sustancia denominada factores nod, lo cual causa el rizado del pelo radical. En esta sustancia se encuentran los genes que dirigirán posteriormente las etapas específicas de la nodulación. Estos son transmitidos a través de plásmidos de gran tamaño llamados Sym (Barrios, 2013).

A continuación, la bacteria invade el pelo radical e induce a la planta a formar un tubo de celulosa conocido como tubo de infección, dentro del cual los rizobios se multiplican. Este tubo se desplaza a través de la raíz hasta alcanzar las células contiguas a los pelos radicales, mientras los factores nod continúan estimulando la división celular vegetal, lo que finalmente conduce a la formación del nódulo (Jimenez, 2022).

Al formarse los nódulos en las raíces de las plantas, aparecen internamente los bacteroides, estructuras en las que las bacterias *Rhizobium* se multiplican y adoptan una forma ramificada e hinchada. Estas células bacterianas deformes son esenciales para la fijación de nitrógeno. Los bacteroides quedan rodeados por porciones de la membrana vegetal, formando estructuras denominadas simbiosomas, dentro de las cuales se inicia el proceso de fijación de nitrógeno (Ballesteros et al., 2018).

Por último, la formación del nódulo radical maduro, se produce una división continua de células tanto bacterianas como vegetales. Esta actividad celular es esencial para que el proceso simbiótico se mantenga activo y funcional.

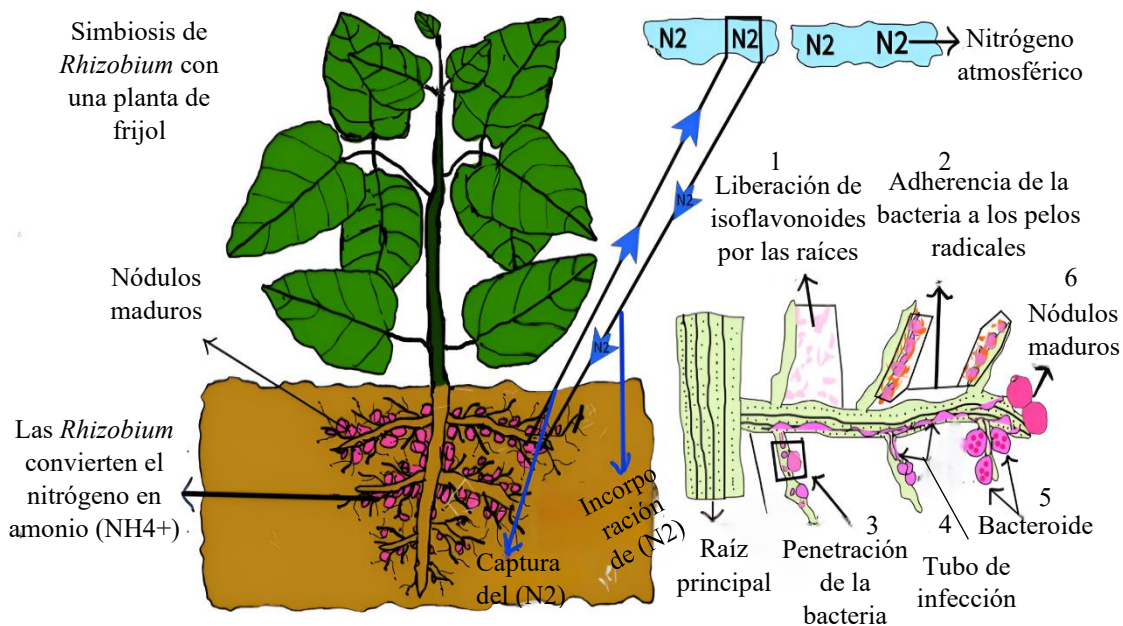


Figura 4. Simbiosis de la bacteria *Rhizobium* con una planta de frijol. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Evidencia científica sobre inoculación microbiana en frijol

La inoculación microbiana en frijol cuenta con evidencia científica en Nicaragua, respaldada por estudios realizados por instituciones como UNA, INTA, UNAN-León y UNI. Estos trabajos han demostrado mejoras en nodulación, absorción de nutrientes, aumento radicular y rendimiento del cultivo, especialmente en condiciones de baja fertilidad y estrés hídrico características del corredor seco nicaragüense. Los resultados encontrados (Cuadro 1), confirman que la aplicación de microorganismos como *Rhizobium*, Micorrizas y *T. harzianum* representan una alternativa viable y sostenible frente al manejo convencional, con ventajas económicas y ambientales relevantes para pequeños productores.

Cuadro 1. Resultados de estudios previos en Nicaragua sobre inoculación microbiana en frijol.

Institución	Tema	Resultados principales	Citas
UNA Managua	Micorrizas y <i>Rhizobium</i> : opciones agroecológicas para la nutrición del frijol (<i>P vulgaris</i>), Managua- Ticuantepe 2016	Incremento en nodulación, absorción de P y vigor radicular; mejoras en rendimiento bajo suelos de baja fertilidad.	(Blandón y García, 2017)
	Efecto de la inoculación con rizobios y micorrizas	Incremento en la biomasa aérea, peso seco de raíz y la absorción de	

UNA Managua	sobre el crecimiento, rendimiento y la rentabilidad del cultivo de frijol común (<i>P. vulgaris</i>), Sabana Grande, Managua, 2021	nitrógeno, lo que se tradujo en un mayor rendimiento del cultivo, además, en una rentabilidad económica superior.	(Polanco y Vanegas, (2021)
INTA Ticuantepe	Uso de Inoculantes biológicos en la producción del cultivo del Frijol (<i>P. vulgaris</i>): Micorrizas, <i>Trichoderma</i> , <i>Rhizobium</i> 2024	La variedad de frijol INTA Rojo mostró un mejor comportamiento agronómico, reflejado mayor vigor vegetativo, nutrición y un incremento en el rendimiento, alcanzando hasta cuatro quintales más sobre el promedio nacional de 14 quintales por manzana.	(Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2024).
UNAN León	Evaluación del potencial de hongos Micorrizas y bacterias <i>Rhizobium</i> en el desarrollo fenológico y rendimiento del cultivo de frijol (<i>P. vulgaris</i> L) 2023	El estudio reportó que la inoculación combinada con micorrizas y rizobios fue la más efectiva, logrando un mejor desarrollo fenológico, mayor vigor vegetativo y reproductivo, incremento en número de hojas, vainas y granos por planta, así como una colonización más eficiente de la raíz, lo que se tradujo en el rendimiento más alto con 1,798 kg/h.	(Medina et al., 2023).
UNI Managua	Evaluación de un sustrato artesanal para la producción de <i>Rhizobium</i> en el cultivo de frijol, en Centro Nacional de Investigación Agropecuaria	El estudio demostró que los medios y sustratos artesanales evaluados permiten una producción eficiente de <i>Rhizobium</i> para frijol, destacando el medio líquido frijol con la cepa CIAT 899 por su rápida multiplicación, y los sustratos sólidos como suelo y lombriz humus por su mejor sobrevivencia y nodulación.	(Bravo y Chavarría, 2021).

3.5 Paquetes utilizados en el análisis estadístico R

Para analizar los datos del experimento se usaron paquetes de R que ayudan a trabajar de manera ordenada, confiable y práctica. El propósito de elegirlos fue asegurar un proceso claro que se adapte bien al diseño que se aplicó. Estos paquetes permiten importar y organizar grandes cantidades de información sin perder detalle, facilitan la limpieza y transformación de los datos, y ofrecen herramientas avanzadas para ajustar modelos estadísticos.

Además de comparar tratamientos con precisión. Todos ellos, forman un sistema que garantiza que los resultados sean consistentes y que las conclusiones tengan validez, siguiendo las buenas prácticas actuales en investigación agrícola.

3.5.1 afex

En el estudio se aplicó la función `aov_ez`, que permitió realizar análisis de varianza en diseños factoriales con medidas repetidas. Se especificaron los argumentos `id` para identificar las plantas, `dv` para las variables dependientes (altura, diámetro del tallo, número de hojas), `within` para las fechas de evaluación y `between` para los tratamientos y bloques (Singmann et al., 2025).

3.5.2 readxl

Para el análisis, este paquete se empleó a través de la función `read_excel`, que permitió importar la base de datos directamente desde hojas de cálculo en formato Excel. Se especificó la ruta del archivo garantizando que las variables se mantuvieran con sus tipos originales numéricas, texto y fechas (Wickham y Bryan, 2025).

3.5.3 tidyverse

Es un lenguaje para resolver desafíos de la ciencia de datos con código R. Dentro de sus funciones se destacan; importación, limpieza, manipulación, visualización y programación de datos, el objetivo es proporcionar herramientas para los desafíos más comunes, no para resolver todos los problemas posibles. Estos conjuntos de herramientas son fundamentales para la ciencia de datos, pero son tan extensos que merecen un tratamiento aparte. El paquete tidyverse permite a los usuarios instalar todos los paquetes del tidyverse con un solo comando (Wickham et al., 2019).

3.5.4 dplyr

Con Tidyverse y su núcleo Dplyr se emplearon funciones como `group_by`, `summarise`, `filter` y `mutate`, que facilitaron la organización y limpieza de los datos. Estas herramientas se usaron para agrupar por planta, tratamiento y bloque, calcular promedios y verificar la estructura de los factores (Wickham et al., 2014).

3.5.5 lmer

En el estudio se usó la función `lmer`, que permitió ajustar modelos lineales mixtos para variables de rendimiento y productivas. La fórmula incluyó el tratamiento como efecto fijo y el bloque como efecto aleatorio (Bloque), lo que permitió modelar la variabilidad entre bloques y obtener estimaciones más robustas (Bates et al., 2015).

3.5.6 emmeans

En este estudio, su aplicación se concretó mediante la función `emmeans` seguida de `pairs`, que permitió calcular medias marginales ajustadas y realizar comparaciones múltiples entre tratamientos. Se usaron métodos de comparación según el criterio de Tukey, lo que garantizó interpretaciones precisas y controladas de las diferencias honestamente significativa en las variables de rendimiento (Lenth y Piaskowski, 2017).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación y fecha del estudio

El estudio se realizó en el Centro Tecnológico Agropecuario (CETA) Arlen Siu, en el municipio de El Sauce, departamento de León. El Sauce es un municipio altamente productivo de granos básicos a manos de pequeños productores. El área de estudio se situó a 1 km del casco urbano del municipio; en las coordenadas UTM 549158.64 m E y 1423968.82 m N.

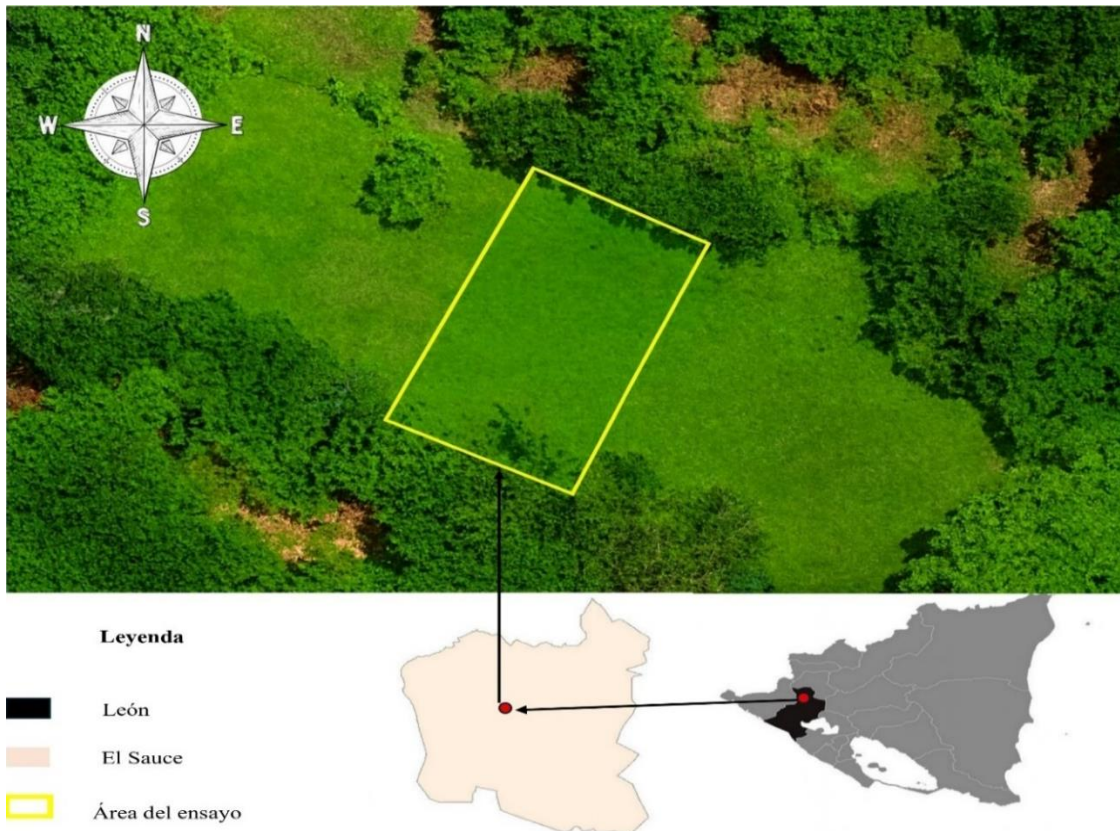


Figura 5. Ubicación geográfica donde se realizó el ensayo. Fuente. Google Earth Pro

El municipio se encuentra dentro del corredor seco centroamericano, caracterizado por dos estaciones bien marcadas: una seca de noviembre a abril, y la otra lluviosa entre mayo y octubre, con la presencia de una canícula o veranillo definida entre el 15 de julio al 15 de agosto. Esta zona cuenta con precipitaciones anuales aproximadas a 1,300 mm, temperaturas mínimas promedios de 25 °C y temperaturas máximas promedios de 37 °C (Climate Engine, 2025). Predominan los suelos francos, adecuados para cultivos como maíz, frijol y sorgo.

El ensayo se realizó en la época de primera, correspondiente a los meses de junio y julio de 2025, periodo en el que el ciclo lluvioso suele establecerse en la región. De acuerdo con los boletines climáticos mensuales del (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales [INETER], 2025), durante este periodo se registraron acumulados de lluvia por encima de lo normal en junio 100 a 200 mm y por debajo en julio 10 a 50 mm en el municipio de El Sauce. Estos valores coinciden con los datos obtenidos mediante la plataforma Climate Engine, representados en la Figura 13, la cual evidencia la distribución de la precipitación y las temperaturas registradas durante el ensayo.

4.2 Diseño experimental

El enfoque de esta investigación es de carácter cuantitativo experimental. El estudio se estableció bajo un diseño factorial en bloques completos al azar (BCA), siendo el factor en estudio los inóculos Micorriza arbusculares, *T. harzianum* y *Rhizobium*, sus consorcios (cuatro) y el testigo absoluto. Este diseño se utilizó para controlar la fuente de variación asociada a la luminosidad, ya que la presencia de árboles ubicados al este y al oeste del área experimental representaba un gradiente en la incidencia de la radiación solar sobre el área experimental.

Se establecieron ocho tratamientos, cada uno repetido en cuatro bloques, lo que equivalió a 32 unidades experimentales. El área experimental total del ensayo fue de 561 m² (17 x 33 m), cada unidad experimental tuvo una dimensión de nueve m² (3 x 3 m), con una distancia de siembra de 0.45 metros entre surcos y 0.12 metros entre plantas, conformando seis surcos por unidad experimental (Anexo 1).

Dentro de cada unidad experimental se delimitó las parcelas útiles, compuestas por los cuatros surcos centrales, dejando 0.50 metros de cabecera para minimizar el efecto de borde. La densidad poblacional teórica para una hectárea representó 185,185 plantas, mientras que, para el área efectiva del ensayo (288 m² de cultivo efectivo), se establecieron 5,333 plantas en total. Los bioinsumos utilizados en el presente estudio fueron adquiridos en el Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA), Nicaragua, institución que desarrolla y transfiere tecnologías biológicas para la producción sostenible. Los tratamientos experimentales para evaluar se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos evaluado en el cultivo de frijol.

Tratamientos	Descripción	Dosis g/ha ⁻¹	Dosis por tratamiento g
T ₁	Micorriza	709	2.55
T ₂	<i>Rhizobium</i>	997	3.58
T ₃	<i>Trichoderma harzianum</i>	997	3.58
T ₄	Testigo	-	-
T ₅	Micorrizas + <i>T. harzianum</i>	709 + 997	2.55 + 3.58
T ₆	<i>Rhizobium</i> + <i>T. harzianum</i>	997 + 997	3.58 + 3.58
T ₇	Micorrizas + <i>Rhizobium</i>	709 + 997	2.55 + 3.58
T ₈	Micorriza + <i>Rhizobium</i> + <i>T. harzianum</i>	709 + 997 + 997	2.55 + 3.58 + 3.58

El modelo aditivo lineal que se utilizó en el experimento fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

donde:

- Y_{ij} : valor observado de la variable respuesta para el i-ésimo inoculante, en el j-ésimo bloque.
- μ : media general
- α_i : efecto fijo del i-ésimo inoculante.
- β_j : efecto aleatorio del j-ésimo gradiente de luminosidad.
- ε_{ij} : error aleatorio que se asume independiente, se distribuye normal, varianzas homogéneas, efectos aditivos y media cero.

4.3 Manejo del ensayo y metodología

4.3.1 Preparación del terreno

El terreno se preparó diez días antes de la siembra, iniciando con la limpieza del área, con el fin de despejar completamente la zona de estudio. Dos días después se realizó un pase de grada

orientado a voltear el suelo y romper la capa superficial (Anexo 2), para facilitar la germinación y emergencia de la semilla de frijol.

Posteriormente, se procedió a la delimitación de los bloques experimentales y las parcelas correspondientes a cada tratamiento (Anexo 3), utilizando estacas, lienza y cinta métrica para garantizar precisión en el trazado. Finalmente, los tratamientos y sus respectivas repeticiones fueron señalizados conforme al esquema de aleatorización establecido en el plano de campo.

4.3.2 Prueba de germinación

La variedad Cuarentano presentó un porcentaje de germinación del 95%. Esta prueba se llevó a cabo en bandejas a las cuales se le depositó tierra fértil, donde se colocaron 100 semillas distribuidas de manera uniforme en cada alveolo, a una profundidad no mayor a 2.5 cm. La evaluación se realizó siete días después de la siembra, contabilizando el número de semillas germinadas. El cálculo del porcentaje de germinación se determinó utilizando una regla de tres simple, cuya incógnita fue, el porcentaje equivalente a número de semillas germinadas.

$$PG = \left(\frac{SG}{n} \right) * 100$$

Donde:

PG: Porcentaje de germinación

SG: Semillas germinadas

n: Número total de semillas en prueba (100 semillas)

4.4 Inoculación de las semillas de frijol

La inoculación de las semillas se llevó a cabo mediante el método de recubrimiento, aplicando el mismo procedimiento para todos los tratamientos. Como adherente se utilizó una mezcla de aceite vegetal y agua, la cual se incorporó junto con las semillas de frijol dentro de una bolsa plástica. A cada tratamiento se le añadió la dosis específica del inóculo correspondiente (Cuadro 3).

La mezcla se agitó manualmente durante un minuto para asegurar una cobertura homogénea sobre las semillas y luego se dejó reposar durante una hora a temperatura ambiente antes de la siembra, con el propósito de favorecer la adhesión del inoculante y asegurar su efectividad al momento del establecimiento del cultivo (Anexo 4).

Cuadro 3. Dosis de microorganismos utilizadas para la inoculación de las semillas de frijol en cada tratamiento evaluado.

Tratamientos	Cantidad de semillas de frijol (g)	Micorrizas (g)	T. <i>harzianum</i> (g)	<i>Rhizobium</i> (g)	Adherentes Aceite vegetal (ml) + agua (ml)
Micorrizas	131	2.55	-	-	0.5 + 0.5
<i>T. harzianum</i>	131	-	3.58	-	0.5 + 0.5
<i>Rhizobium</i>	131	-	-	3.58	0.5 + 0.5
Testigo	131	-	-	-	-
Micorrizas+ <i>T. harzianum</i>	131	2.55	3.58	-	1 + 1
<i>Rhizobium</i> + <i>T. harzianum</i>	131	-	3.58	3.58	1 + 1
Micorrizas+ <i>Rhizobium</i>	131	2.55	-	3.58	1 + 1
Micorrizas + <i>T. harzianum</i> + <i>Rhizobium</i>	131	2.55	3.58	3.58	1.5 + 1.5

4.5 Siembra

La siembra se realizó durante la tercera semana de junio, aprovechando las condiciones favorables de humedad edáfica y las precipitaciones registradas en ese período. El establecimiento del cultivo se efectuó de manera manual, utilizando un distanciamiento de 0.45 m entre surcos y 0.12 m entre plantas. La delimitación de cada surco se llevó a cabo utilizando cinta métrica, estacas y lienzo, con el fin de garantizar precisión en el trazado. Este diseño de siembra permitió alcanzar una densidad estimada de 185,185 plantas por ha⁻¹.

4.6 Manejo de plagas

Una semana después de la germinación de las plántulas, se inició el monitoreo fitosanitario mediante muestreos semanales para la identificación de insectos plagas, con enfoque en los

organismos chupadores y defoliadores. Para el manejo preventivo de estas plagas, se aplicó un extracto botánico compuesto por neem (*Azadirachta indica*) y ajo (*Allium sativum*), aplicado a una dosis de 1000 ml por bomba de 20 litros. Este producto fue utilizado como repelente natural, con el objetivo de reducir la incidencia de insectos sin recurrir a agroquímicos sintéticos.

Las principales plagas que afectaron al cultivo durante el ensayo fueron Tortuguilla (*Diabrotica spp*), Pulgón negro del frijol (*Aphis craccivora*), Gusano terciopelo (*Anticarsia gemmatalis*) y Trips (*Megalurothrips usitatus*).

4.7 Manejo de arvenses

El control de arvenses se llevó a cabo mediante métodos manuales, empleando herramientas como azadón y machete. Esta labor se ejecutó en la segunda semana posterior a la germinación y se realizaba todas las semanas hasta los 40 días de establecido el cultivo. Con especial enfoque en el periodo crítico de competencia del cultivo, comprendido entre uno y 30 días después de la siembra (dds).

4.8 Cosecha

La cosecha se realizó una vez que las plantas alcanzaron su madurez fisiológica, correspondiente a los 72 días después de la siembra (dds). En esta etapa se llevó a cabo el arranque manual de las plantas, permitiendo su permanencia en campo para facilitar el proceso de secado natural. La evaluación del estado de deshidratación se basó en criterios visuales, específicamente en la coloración de las vainas, las cuales debían presentar tonalidades pardo oscuro o plomo como indicativo de pérdida significativa de humedad (Anexo 6).

Una vez alcanzado el punto de secado adecuado, se realizó el desvaine manual, separando las vainas de las plantas para su posterior desgrane, también efectuado manualmente. Este método fue seleccionado con el objetivo de minimizar la pérdida de granos vanos y reducir el margen de error en la medición de grano comercializable durante la etapa postcosecha.

Cada una de las actividades descritas se ejecutó de forma independiente en cada tratamiento y unidad experimental, garantizando la trazabilidad en la recolección de datos.

4.9 Variables evaluadas

Se evaluaron variables de crecimiento y de rendimiento a lo largo del ciclo del cultivo. Para la medición de estas variables, se seleccionó una muestra representativa de 12 plantas. La elección se realizó con una calculadora científica, utilizando la función selección aleatoria, considerando los cuatro surcos de la parcela útil.

A partir del total de plantas contabilizadas en cada surco, se determinó la elección de tres plantas por hilera, las cuales fueron marcadas individualmente para su evaluación continua durante todo el ciclo fenológico. Esta actividad se llevó a cabo cuando las plantas contaban con cinco días de germinadas, asegurando homogeneidad en la selección de las plantas a evaluar.

4.10 Variables de crecimiento

4.10.1 Altura de planta (cm)

La altura de la planta se midió con cinta métrica, desde la base del tallo hasta el ápice de la planta. Esta variable se registró desde los cinco días de germinación hasta los 28 ddg, con un intervalo de tiempo cada siete días.

4.10.2 Número de hojas trifoliadas

Se contaron las hojas trifoliadas desarrolladas, con intervalo de tiempo cada siete días. La evaluación comenzó desde los 13 hasta los 28 días después de la germinación (ddg). Debido que en la primera fecha no presentó hojas trifoliadas completamente desarrolladas.

4.10.3 Diámetro del tallo (mm)

El diámetro del tallo se midió con vernier en la parte basal, a una altura fija de seis centímetros desde el nivel del suelo. Como referencia para estandarizar la medición, se usó una rama leñosa ajustada a dicha medida. Esta variable se registró desde los seis días de germinación hasta los 28 ddg, con un intervalo de tiempo cada siete días.

4.11 Variables de rendimiento en período de cosecha

4.11.1 Vainas por planta

Al momento de la cosecha, se extrajeron las 12 plantas previamente seleccionadas en cada unidad experimental, contabilizando el número total de vainas desarrolladas por plantas.

4.11.2 Número de granos por planta

Para esta variable se utilizaron las mismas vainas previamente extraídas de las plantas seleccionadas por unidad experimental, correspondientes a la variable "número de vainas por planta". Se contabilizó el número total de granos por planta, y posteriormente se sumó el total de granos por planta.

4.11.3 Porcentaje de grano comercializable

Se cosechó la parcela útil y se pesó la semilla obtenida en gramos. Posteriormente, se realizó una inspección visual para seleccionar únicamente los granos con características comerciales, descartando aquellos vanos, dañados o con defectos físicos. Una vez separado el grano comercial, se calculó el porcentaje de calidad comercial mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de grano comercial} = \left(\frac{\text{Peso de grano comercial}}{\text{Peso total cosechado}} \right) * 100$$

4.11.4 Rendimiento kg/ha⁻¹

El rendimiento se calculó a partir del total de granos obtenidos de 48 plantas por tratamiento, considerando un contenido de humedad del 13%. Posteriormente, se convirtió a kilogramos por hectárea (kg·ha⁻¹) mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Rendimiento kg/ha}^{-1} = \text{N}^{\circ} \text{ de granos} \frac{\text{Peso 100 granos}}{100} * \frac{\text{Densidad poblacional}}{1000}$$

4.12 Análisis de datos

Para evaluar el efecto de los tratamientos, los datos fueron organizados y depurados en una hoja de cálculo de Microsoft® Excel® 2019 MSO (versión 2310, compilación 16.0.16924.20054) de 65 bits. Este proceso se realizó por separado para cada grupo de variables, crecimiento, productivas y rendimiento.

El procesamiento de datos, la validación de supuestos y los análisis fueron realizados en el Entorno de Desarrollo Integrado RStudio (Posit team, 2025), para el lenguaje de programación estadística R, (R Core Team 2025); versión 4.4.3, 2025-02-28 ucrt. utilizando los paquetes Afex (Singmann et al., 2025), lmer (Bates et al., 2015) , Emmeans (Russell 2025), Tidyverse (Wickham et al., 2019), Dplyr (Wickham et al., 2023), Readxl (Wickham y Bryan, 2025), y extrafont (Chang 2025).

En las variables de crecimiento se aplicó un análisis de varianza de medidas repetidas mediante la función `aov_uz` del paquete `afex`, considerando como efectos fijos las fechas y los tratamientos y como efectos aleatorios los bloques. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de esfericidad mediante la prueba de Mauchly. Al detectarse incumplimiento, se aplicaron las correcciones de Greenhouse-geisser y Huynh-Feldt, ajustando los grados de libertad para reducir el sesgo en la estimación de los efectos. La significancia de los efectos deseados (tratamientos) fueron interpretadas con base a valores de F (Fisher) y sus respectivos valores de probabilidad (*p*-value).

Para el análisis de las variables de rendimiento, se utilizó un modelo lineal mixto robusto sin comprometer los supuestos, ajustados por máxima verosimilitud restringida (REML) utilizando la función `lmer`. Cada variable dependiente fue modelada en función del factor inoculantes, incorporando el efecto aleatorio de bloque para capturar la variabilidad experimental inherente a la luminosidad.

La validación de los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas se realizó, de manera informal, mediante inspección visual de histogramas, gráficos QQ y gráficos de residuos versus valores ajustados, confirmando la adecuación de los modelos sin comprometer sus supuestos. Así mismo, formalmente los supuestos (normalidad y homocedasticidad) de los modelos y sus respectivas hipótesis fueron contrastadas mediante las funciones `shapiro.test` y `levene.test` del paquete `car` (Fox y Weisberg 2019).

Posteriormente, se aplicaron comparaciones múltiples de medias ajustadas mediante el paquete `emmeans`, utilizando la prueba honestamente significativa de Tukey $p \leq 0.05$.

4.13 Análisis económico

Para evaluar la rentabilidad de los tratamientos experimentales, se utilizó la metodología del presupuesto parcial propuesta por el centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT], 1988). Esta herramienta permite estimar la relación costo beneficio, de cada tratamiento. Los parámetros considerados en este análisis incluyen:

Rendimiento obtenido: Expresado en kg ha⁻¹.

Rendimiento ajustado: Contempla la reducción del 10% del rendimiento bruto con fin de reflejar las diferencias entre el rendimiento experimental y el rendimiento que el productor podría obtener en campo usando la misma biotecnología.

Ingreso bruto en campo: Se obtuvo mediante la multiplicación del rendimiento ajustado por el precio del producto al momento de la cosecha.

Costos variables: Implican los costos de inoculantes.

Beneficio neto: La resta del ingreso bruto en campo menos los costos variables.

Dominancia: Se llevó a cabo mediante el orden de los tratamientos según el incremento de sus costos variables. Un tratamiento se considera dominado cuando sus costos variables son mayores y sus beneficios netos iguales o inferiores al de otro tratamiento con menor costo variable. En cambio, un tratamiento se considera no dominado cuando, al aumentar su costo variable respecto a otro, también incrementa su beneficio neto, constituyendo una opción económicamente viable.

Tasa de retorno marginal: Se estimó a partir de los tratamientos no dominados. Para su cálculo se aplicó una regla de tres simple.

$$\text{Tasa de retorno marginal} = \left(\frac{\text{Beneficio neto marginal}}{\text{Costo variable marginal}} \right) * 100$$

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Variables de crecimiento

El análisis de ANOVA para medidas repetidas mostró que, a los seis días después de la germinación (DDG), no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en las variables de crecimiento. Sin embargo, a partir de los 14 DDG empezó a observarse incrementos notables, siendo en los 21 y 28 DDG cuando las diferencias estadísticas fueron mayores.

En términos generales, los tratamientos inoculados con Micorriza+*Rhizobium*, tanto de forma individual como en combinación con *T. harzianum*, mostraron los valores más altos en las variables altura de planta, número de hojas trifoliadas y diámetro del tallo, reflejando una respuesta fisiológica positiva ante la inoculación con microorganismos.

Las medias observadas entre los tratamientos reflejan la interacción simbiótica entre los microorganismos y las plantas de frijol, mejorando la adsorción de nutrientes y un mayor desarrollo vegetativo del cultivo, incluso en presencia de condiciones ambientales adversas. Este efecto coincide con lo señalado por Soley et al., (2025), quienes resaltan que la efectividad de los inoculantes microbianos, depende en gran medida de su estabilidad a lo largo del tiempo, facilitando una mejor colonización y desempeño fisiológico de las plantas inoculadas en condiciones de campo.

5.1.1 Altura de la planta

La altura de la planta es una variable agronómica fundamental para evaluar el vigor y desarrollo vegetativo. Su comportamiento depende de factores ambientales como la luz solar, la temperatura, la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes (Pérez y López, 2023).

El análisis de medidas repetidas mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 14.38$, $p < 0.0001$), lo que indica que la respuesta en la variable varió a lo largo del tiempo de evaluación. La altura de las plantas aumentó conforme avanzaron los días después de la germinación (DDG), excepto en los tratamientos *T. harzianum* y Testigo, que mostraron una reducción significativa en las últimas evaluaciones.

Durante la primera evaluación no se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Sin embargo, a los 14 DDG los tratamientos Micorriza+*Rhizobium*, *Rhizobium*+*T. harzianum* y *Rhizobium* alcanzaron las mayores alturas, diferenciándose significativamente del Testigo y *T. harzianum*. Figura (6). A los 21 DDG Micorriza+*Rhizobium* mantuvo su superioridad, presentado diferencias significativas frente a Micorriza+*T. harzianum*, mientras que *Rhizobium*+*T. harzianum* y *Rhizobium* mostraron una disminución en el crecimiento.

Finalmente, a los 28 DDG, Micorriza+*Rhizobium* registro la mayor altura promedio (99 cm), seguido por *Rhizobium* (98 cm), Micorriza (95 cm) y Micorriza+*T. harzianum* (94 cm), que no se diferenciaron estadísticamente entre sí. En cambio, *T. harzianum* con (72 cm) y Testigo (65 cm) presentaron las menores alturas, diferenciándose de los demás tratamientos.

La superioridad del tratamiento Micorriza+*Rhizobium* puede atribuirse a la sinergia funcional entre ambos microorganismos. De acuerdo con Begum et al., (2019), las micorrizas arbusculares amplían la zona de exploración radicular, mejorando la absorción de fósforo y agua, además de facilitar la movilización de micronutrientes disponible en el suelo. Además, para Carballo y Flores, (2022), *Rhizobium* incrementa la disponibilidad de nitrógeno mediante fijación biológica, promoviendo la síntesis de proteínas y clorofila esenciales para el crecimiento vegetativo. Esta interacción estimula tanto el desarrollo radicular como la eficiencia fotosintética, esto se traduce en mayor biomasa y vigor fisiológico.

Los resultados de esta investigación son similares con el estudio de Medina et al., (2023), quienes reportaron una mayor altura en frijol con la inoculación de Micorriza+*Rhizobium* respecto a los tratamientos individuales y al testigo, cuya altura media máxima fue 46 cm. Sin embargo, en el presente estudio la mayor media fue muy superior 99 cm. Esto puede atribuirse a diferencias en las condiciones edafoclimáticas, variedad y tipo de crecimiento, mayor eficacia en el establecimiento de los microorganismos o cepas utilizadas en el estudio.

Estos hallazgos sugieren que Micorrizas+*Rhizobium* interactúan complementariamente para favorecer el crecimiento vegetativo de la planta, al mejorar la disponibilidad y aprovechamiento de nutrientes del suelo, reafirmando el efecto positivo de la inoculación sobre el desarrollo del cultivo.

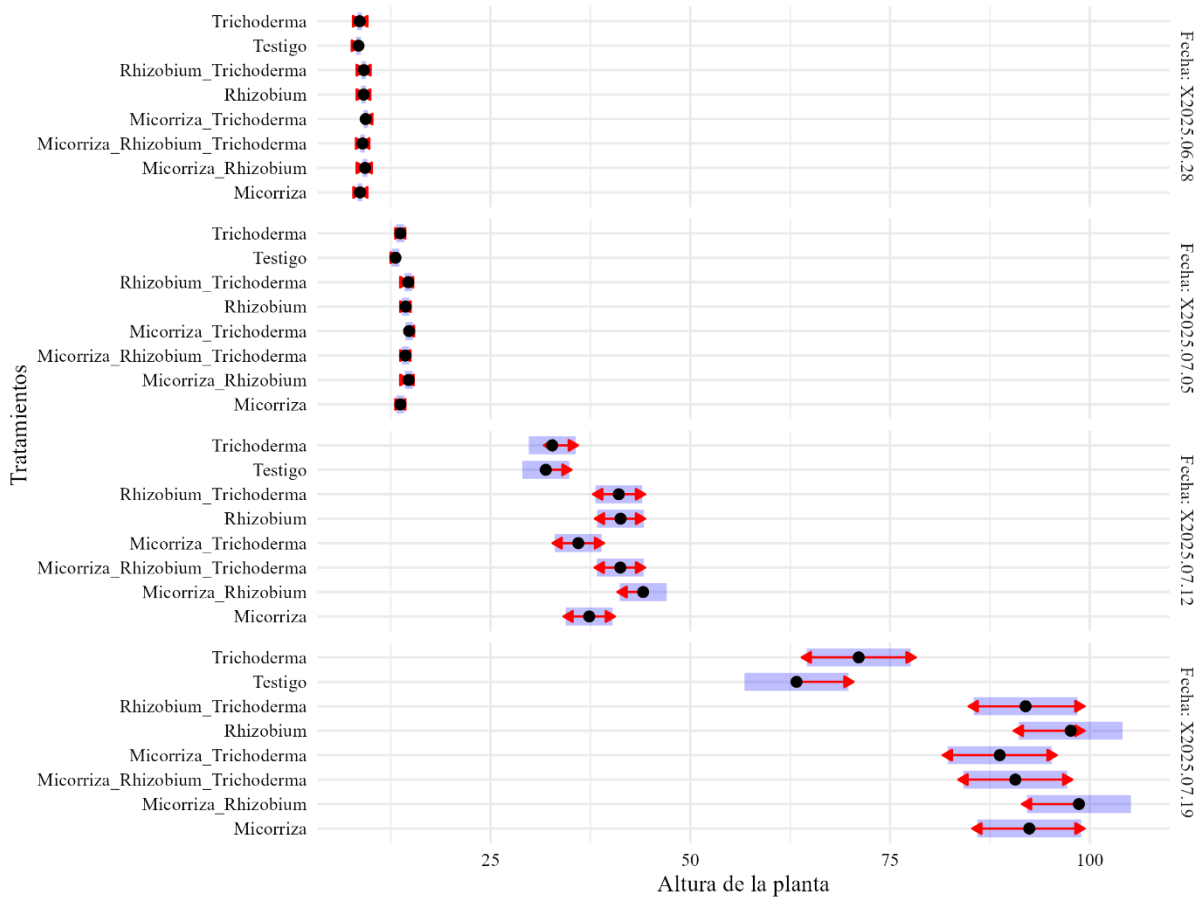


Figura 6. Comparación de la altura de la planta (cm) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.

5.1.2 Número de hojas trifoliadas

Las hojas son órganos esenciales en las etapas iniciales y de desarrollo vegetativo del cultivo. En la planta de frijol posee dos tipos de hojas; los cotiledones en la primera etapa encargado del suministro de reservas de nutrientes y hormonas de crecimiento para la emergencia y las hojas verdaderas asumen la función fotosintética, transformando la energía luminosa en energía química, proceso vital para el crecimiento y rendimiento del cultivo (Taiz et al., 2022).

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 13.74$; $p < 0.0001$), lo que confirma que los tratamientos influyeron de manera sostenida sobre la variable a través del tiempo de evaluación. La cantidad de hojas trifoliadas varió según el tipo de inoculación aplicada, con incrementos más marcados en los tratamientos que establecieron asociaciones simbióticas más eficientes.

Durante la primera evaluación a los 14 DDG no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, ya que todos presentaron valores similares (Figura 7). Sin embargo, A los 21 DDG, se observó un incremento generalizado, destacando Micorriza+*Rhizobium*, que superó a los tratamientos Micorriza, Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum*, Micorriza+*T. harzianum*, *Rhizobium*, *T. harzianum* y Testigo. Finalmente, en la última evaluación 28 DDG, Micorriza+*Rhizobium* mantuvo el mayor número de hojas trifoliadas (17.5 hojas), seguido por *Rhizobium* (16 hojas) y Micorriza (15.5 hojas), que mostraron valores intermedios.

En cambio, el tratamiento *T. harzianum* presentó los valores más bajos de los inoculados (14 hojas), aunque todos superan significativamente al Testigo (10.8 hojas). Con esto podemos confirmar que la inoculación microbiana, independientemente si es combinada o individual, promueve un efecto positivo sobre el desarrollo foliar de las plantas de frijol.

El aumento en el número de hojas trifoliadas obtenido con el tratamiento Micorriza+*Rhizobium* refleja un efecto sinérgico entre ambos microorganismos. Las micorrizas arbusculares mejoran la absorción de fósforo, agua y micronutrientes, mientras que *Rhizobium* incrementa la disponibilidad de nitrógeno por fijación biológica, estimulando la síntesis de proteínas y clorofila necesarias para la formación foliar de las plantas (Martínez, 2018). Esta combinación mejora el metabolismo vegetal, favoreciendo un incremento en la producción de biomasa aérea.

Por su parte, la inoculación con *T. harzianum* actuó como agente de control biológico y promotor de crecimiento, al inducir la síntesis de fitohormonas como auxinas y giberelinas que estimulan la división celular y la elongación de tejidos (Máquez et al., 2017). No obstante, su efecto fue más consistente en consorcios microbianos, lo que evidencia que la eficiencia del hongo depende de las combinaciones con otros microorganismos para optimizar la simbiosis en plantas de frijol.

Estos resultados coinciden con lo reportado por González y Nuñez., (2012), quienes registraron un incremento en el número de hojas trifoliadas en *P. vulgaris*, al inocular *Rhizobium*+Micorrizas de forma combinada e individual, los mejores resultados los obtuvieron en la doble inoculación superando a los tratamientos individuales y al Testigo. Aunque en dicho estudio no mencionaron medias de los tratamientos, en la presente investigación se registró la media superior (17.5 hojas) en el tratamiento Micorrizas+*Rhizobium*, esta cantidad de biomasa

se atribuye a la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, donde al incrementar la cantidad de este nutriente se traduce en una mayor acumulación de biomasa aérea.

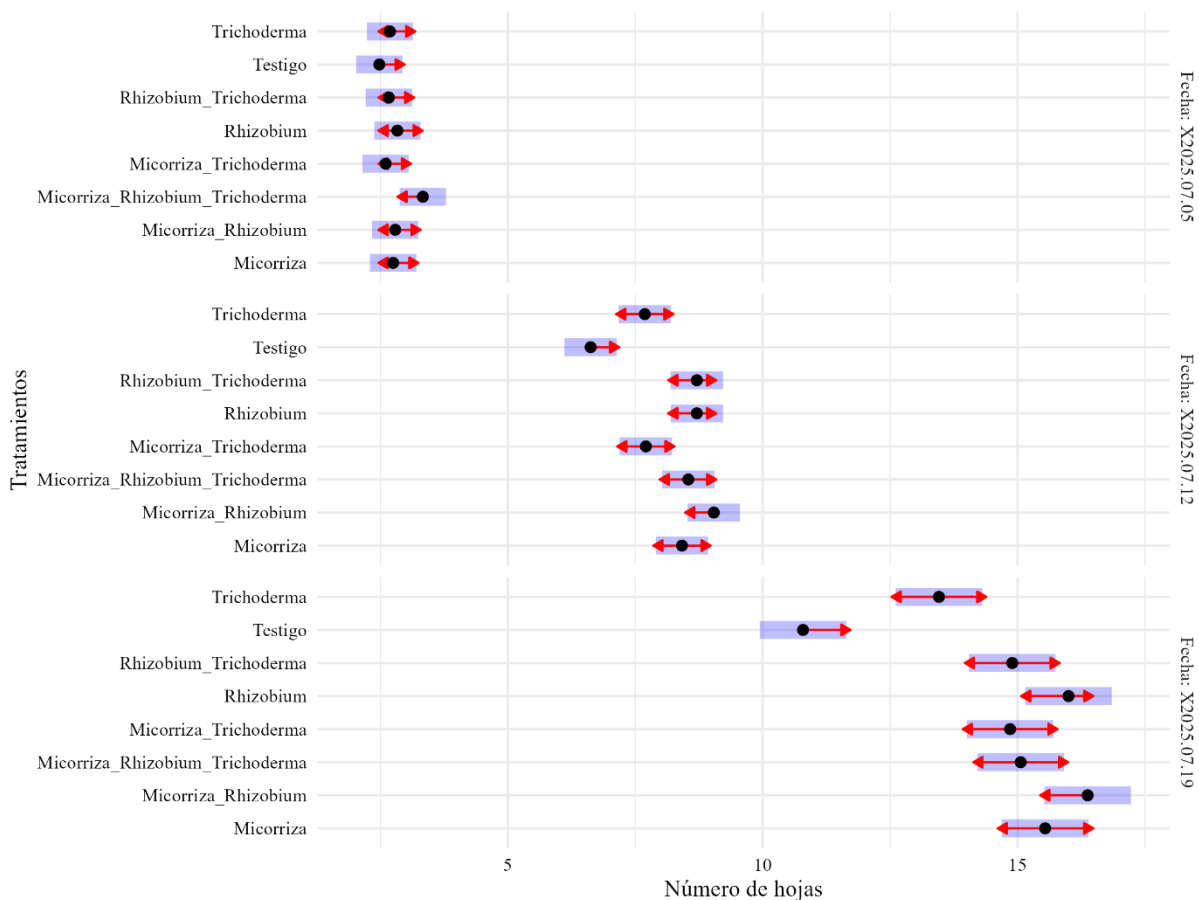


Figura 7. Comparación del número de hojas trifoliadas (promedio) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.

5.1.3 Diámetro del tallo

El tallo constituye el eje central de la planta, formado por una sucesión de nudos y entrenudos que permiten la inserción de hojas, ramas y estructuras reproductivas. Su desarrollo se origina en el meristemo apical del embrión, cuya dominancia regula el crecimiento vertical y define la arquitectura inicial de la planta (Simpson et al., 2022).

En cuanto a esta variable, el análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 21.79$; $p < 0.0001$), lo que indica que la inoculación de los microorganismos tuvo efectos a lo largo del tiempo de evaluación. La respuesta fue mayor según el tratamiento

inoculado, con incrementos más notorios en aquellos que promovieron asociaciones simbióticas más eficientes.

Durante la primera evaluación a los seis días DDG (Figura 8), las medias del diámetro del tallo fueron similares, aunque se observaron tendencias mayores en Micorriza, *T. harzianum* y Micorriza+*Rhizobium*, que superan significativamente al Testigo, sin presentar diferencias de los demás tratamientos combinados. A los 14 DDG, se demostró diferencias significativas entre el Testigo y todos los tratamientos inoculados, destacando Micorriza, *T. harzianum* y Micorriza+*Rhizobium* con las mayores medias.

Durante la tercera evaluación 21 DDG, las diferencias fueron más notorias. Los tratamientos combinados Micorriza+*Rhizobium* y *Rhizobium*+*T. harzianum* mantuvieron un incremento sostenido del grosor del tallo, diferenciándose significativamente del Testigo y de Micorriza+*T. harzianum*, mientras que los tratamientos individuales mostraron una ligera desaceleración en el diámetro.

Finalmente, a los 28 DDG, los tratamientos que conservaron las mayores medias de diámetro fueron *Rhizobium*+*T. harzianum* (4.8 mm) y Micorriza+*Rhizobium* (4.7 mm), aunque fueron estadísticamente similares a los demás tratamientos inoculados, a excepción del Testigo (3.8 mm) y *T. harzianum* (4.4 mm), siendo el Testigo quien registró los valores más bajo en todas las fechas evaluadas, confirmando una vez más, el efecto positivo de la inoculación microbiana sobre el desarrollo estructural del tallo.

Los resultados obtenidos evidencian que la inoculación con microorganismos benéficos ya sea individual o combinada, tuvo un impacto positivo sobre el diámetro del tallo. Este efecto puede atribuirse a la mejora en la absorción de nutrientes, al estímulo del crecimiento radicular y la activación de procesos fisiológicos que favorecen la formación de tejidos conductores en las plantas.

T. harzianum ha sido descrito como un microorganismos con doble función, agente de control biológico y promotor de crecimiento vegetal, gracias a la producción de fitohormonas y la mejora de la disponibilidad de nutrientes (Saba et al., 2012). En este estudio, los tratamientos con *T. harzianum* presentaron efectos favorables a los seis DDG.

Por su parte, *Rhizobium*, contribuye a inducir respuestas sistémicas en las plantas favoreciendo el crecimiento aéreo. Calero et al., (2019), reportaron una nodulación efectiva y aumento del vigor vegetal en plantas de frijol, resultados similares a los obtenidos en esta investigación, donde el tratamiento *Rhizobium*+*T. harzianum* alcanzó los mayores diámetros en las etapas intermedias y finales (4.8 mm), sugiriendo una interacción positiva entre ambos microorganismos.

La simbiosis micorrízica también desempeñó un papel relevante. Según Delgado y Gutiérrez, (2022), esta asociación mejora la eficiencia fisiológica de las plantas bajo condiciones de estrés o competencia nutricional. De manera similar, en este estudio Micorriza y Micorriza+*Rhizobium* mantuvieron valores competitivos a los tratamientos más eficientes, reflejando una contribución directa a la estabilidad estructural del tallo.

Los resultados de esta investigación coinciden con lo reportado por Khair et al., (2018) y Delgado et al., (2024), quienes demostraron que la inoculación con *Rhizobium*+*T. harzianum* en combinación y micorrizas arbusculares individual incrementó el grosor del tallo y el crecimiento vegetativo en leguminosas, debido a una mayor fijación de nitrógeno y mejor absorción de nutrientes (Figura 8). En conjunto, los resultados del presente estudio confirman que las interacciones simbióticas entre microorganismos benéficos potencian el desarrollo estructural del tallo, mejoran la estructura de las plantas y la eficiencia de transporte de asimilados hacia los órganos fotosintéticos del cultivo.

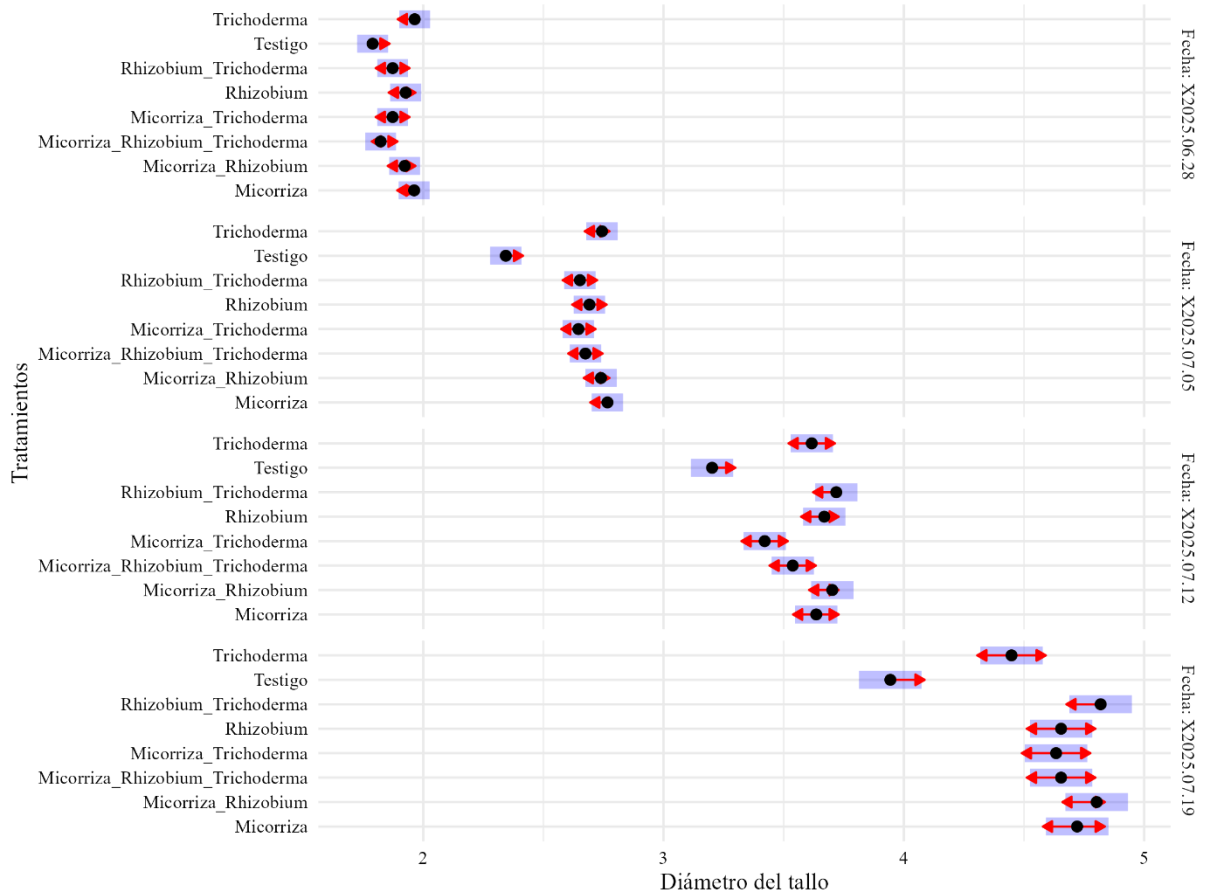


Figura 8. Comparación del diámetro del tallo (mm) por cada tratamiento y fechas evaluadas según el anova de medidas repetidas.

5.2 Variables de rendimiento

El rendimiento, representa una variable fundamental para orientar decisiones agronómicas acertadas, ya que permiten identificar los tratamientos más eficientes y viables para las condiciones productivas de la zona. Por ello, en esta investigación se evaluaron las siguientes variables.

5.2.1 Vainas por planta

El número de vainas por planta es un indicador importante del rendimiento y está relacionado con la formación floral. El número de flores en el cultivo influye directamente en cuantas vainas fecundaron, desarrollo y peso del grano. Además, dado que se vincula la eficiencia productiva del cultivo, se considera uno de los mejores indicadores para medir la productividad por unidad de superficie (Rugama, 2021).

El análisis de esta variable por medio de un modelo lineal mixto mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($F = 65.57$; $p < 0.0001$). En la figura 9, se observa que el tratamiento con Micorriza produjo el mayor número de vainas con una media de 6.90, seguido por *Rhizobium*+*T. harzianum* con 6.73 y Micorriza+*T. harzianum* con 6.48, todos significativamente superiores ($p < 0.0001$) al testigo y *T. harzianum* con 0.58 y 4.42 vainas respectivamente. Además, los tratamientos Micorriza y *Rhizobium*+*T. harzianum* fueron estadísticamente diferentes de Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum*, *T. harzianum* y el testigo.

Aunque el tratamiento con *T. harzianum* aplicado de forma individual no presentó una diferencia significativa con los demás tratamientos inoculados, sí logró mejorar numéricamente respecto al testigo, lo que indica una contribución fisiológica positiva. La marcada diferencia entre los tratamientos inoculados y el testigo refuerza la efectividad de los microorganismos inoculados, especialmente aquellos que se combinan con Micorrizas y *Rhizobium*, ayudan a mejorar, tanto el desarrollo estructural, como la parte reproductiva del cultivo.

La eficiencia en el tratamiento con Micorriza puede estar ligada a lo reportado por Corbera y Nápoles, (2021), quienes explican que inocular con micorrizas arbusculares puede tener efectos importantes en el desarrollo de las raíces, además de fortalecer la resistencia frente a patógenos fúngicos. Estas asociaciones ayudan a que las raíces crezcan mejor y también, a que la rizosfera sea más estable y resistente, lo cual permite una mayor producción de vainas y otros órganos reproductivo de las plantas.

Los valores que obtuvimos en esta investigación sobre el número de vainas por planta superan los reportados por Polanco y Vanegas, (2021), quienes documentaron promedios de 4.5 vainas por planta en tratamientos con micorrizas y 5.7 vainas con *Rhizobium*. Bajo condiciones experimentales similares, nuestro estudio presentó mejores resultados obteniendo la mayor media de 6.90 con el tratamiento de Micorriza y *Rhizobium*+*T. harzianum* con 6.73.

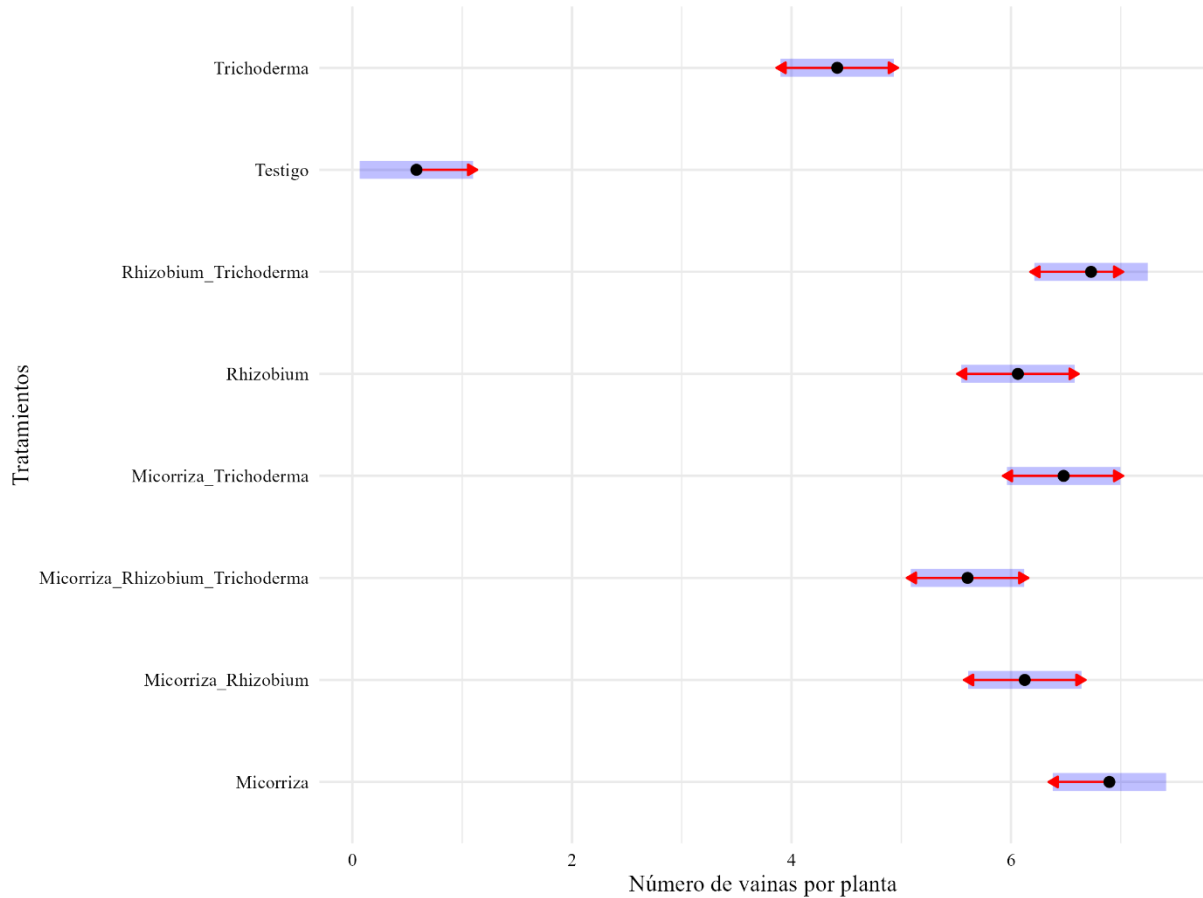


Figura 9. Comparación del número de vainas por planta por cada tratamiento evaluado.

5.2.2 Número de granos por planta

Según Alemán y Calero, (2021), el número de granos por planta constituye uno de los componentes más determinantes para estimar el rendimiento agrícola, ya que esta influenciado por factores externos, como la cantidad de vainas por plantas. Aunque este rasgo tiene un componente genético asociado a la variedad, también depende de las condiciones climáticas de cada región, especialmente de la disponibilidad y distribución del agua durante el ciclo del cultivo. Estas condiciones ambientales definen los niveles de producción al incidir directamente en procesos fisiológicos durante la floración y llenados de granos.

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas en el número de granos por planta entre los tratamientos evaluados ($F = 56.92$; $p < 0.0001$), lo que demuestra que la inoculación de microorganismos ayudó a mejorar esta variable productiva.

En la figura 10, se puede observar que el tratamiento *Rhizobium*+*T. harzianum* alcanzó la mayor cantidad de granos por planta (25.98), seguido por Micorriza (24.79) y Micorriza+*T. harzianum* (24.71). Estos tratamientos no mostraron diferencias significativas entre sí, pero sobresalieron en comparación con Micorriza+*Rhizobium* (23.69), *Rhizobium* (22.83) y Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* (22.54). Todos los tratamientos con inoculación presentaron diferencias estadísticas antes el Testigo y del tratamiento *Trichoderma* que alcanzó una media de 12.73 granos por planta. Estos resultados indican que la inoculación microbiana tiene un efecto positivo en la formación de granos, aunque *T. harzianum* ayuda en estas combinaciones, su eficiencia individual es menor.

Finalmente, el Testigo presentó el valor más bajo con 1.60 granos por planta, y fue estadísticamente inferior a todos los tratamientos inoculados ($p < 0.0001$). Estas diferencias tan marcadas demuestran que las inoculaciones microbianas son efectivas para aumentar la producción, resaltando la importancia en las combinaciones dobles, especialmente la *Rhizobium* más *T. harzianum*.

Según González et al., (2021), *T. harzianum* contribuye a que las raíces secundarias crezcan mejor y mejora la estructura del sistema radicular en general, facilitando que *Rhizobium* colonice las plantas de manera más efectiva. Esta interacción aumenta la fijación natural de nitrógeno y hace que el fósforo sea más disponible, lo cual es fundamental para la formación de granos, tal como lo indican Suárez et al., (2025), quienes señalan que este nutriente participa directamente en la síntesis de ATP, asegurando el suministro energético para la división celular en los tejidos reproductivos y el llenado de las semillas. Además, regula la eficiencia fotosintética y la translocación de carbohidratos desde las hojas hacia las vainas, lo que garantiza un adecuado cuajado y llenado de grano.

Así mismo, *T. harzianum* activa mecanismos de defensa en la planta y produce metabolitos antifúngicos, ayudando a reducir el estrés causado por otros patógenos en las raíces. Los resultados de nuestro estudio respaldan que los microorganismos pueden generar sinergias que favorecen tanto el crecimiento como la producción del cultivo.

Los valores obtenidos son similares a los resultados de Coaquira et al., (2020), quienes reportaron 26 granos por planta en el tratamiento con *Rhizobium*+*T. harzianum* más

biofertilizante en el cultivo de frijol. Bajo condiciones similares a las del presente estudio, los tratamientos evaluados lograron resultados similares, especialmente *Rhizobium*+*T. harzianum* con 25.98 granos por planta, lo que demuestra que las combinaciones microbianas utilizadas son efectivas, especialmente cuando se combina *Rhizobium*+*T. harzianum*.

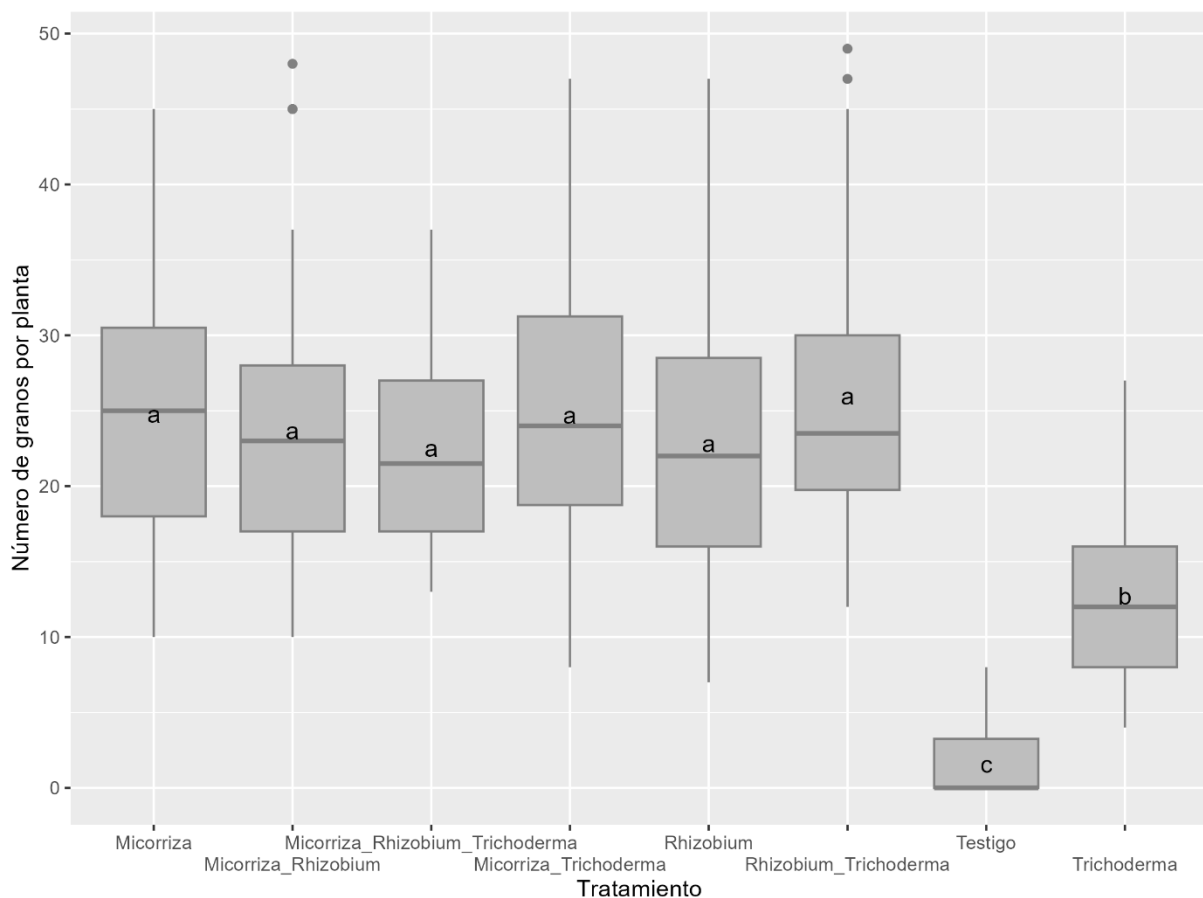


Figura 10. Comparación del número de granos por planta por cada tratamiento evaluado. Nota. Letras diferentes corresponde con tratamientos estadísticamente distintos. La ubicación de las letras dentro de cada caja corresponde con la media de cada tratamiento.

5.2.3 Porcentaje de grano comercializable

El porcentaje de grano comercializable representa un indicador clave para medir que tan eficiente es el proceso de producción, debido que expresa el producto apto para consumo humano o comercialización. Este valor es bastante sensible a las condiciones ambientales debido a que un porcentaje significativo de granos vanos o dañados son ocasionados por exceso o falta de lluvias o también puede atribuirse al déficit nutricional (Perdomo, 2022).

Al aplicar el modelo lineal mixto sobre esta variable, se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($F = 65.65$; $p < 0.0001$), lo que indica que la inoculación con microorganismos tuvo un impacto positivo en la calidad del grano cosechado.

Las medias muestran que el tratamiento *Rhizobium*+*T. harzianum* alcanzó el mayor porcentaje de grano comercializable (96%), seguido por Micorriza+*Rhizobium* (95%), *Rhizobium* (95%) y Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* (95%), aunque no hay diferencias significativas entre estos, todos son superiores estadísticamente al Testigo (72%). Así mismo, Micorriza (94%) y Micorriza+*T. harzianum* (94%) mostraron valores intermedios, mientras que *T. harzianum* alcanzó 93%, siendo similar a los demás tratamientos inoculados (Figura 11). Estos resultados demuestran el efecto positivo que tiene la inoculación microbiana en la producción de grano apto para comercialización.

Lo observado es que, la combinación de *Rhizobium*+*T. harzianum* ayuda a mejorar mucho la calidad del grano, aumentando la cantidad que puede comercializarse o consumirse, lo cual ocurre cuando estos microorganismos trabajan en conjunto y activan diversos mecanismos fisiológicos en la planta. Según Bizo et al., (2020), *T. harzianum* produce antibióticos y enzimas que se regulan a través del ácido jasmónico y vías relacionadas con el etileno, logrando que la planta active varias respuestas defensivas. Mientras tanto, *Rhizobium* ayuda a que la planta fije más nitrógeno, mejorando la síntesis de proteínas y la formación de estructuras reproductivas de mejor calidad.

Además, *T. harzianum* funciona como agente biocontrolador, reduciendo la incidencia de patógenos que afectan el llenado de grano y promoviendo la salud de los tejidos reproductivos. La interacción de estos microorganismos crea un ambiente más estable en la raíz, lo que resulta en granos más uniformes. Estudios anteriores en leguminosas también confirman que inocular con *Rhizobium*+*T. harzianum* mejora, tanto el rendimiento como aspectos de calidad, como el peso del grano, uniformidad y sanidad del grano (Carvajal et al., 2016; Hurtado et al., 2019).

La baja eficiencia del tratamiento *T. harzianum* aplicado de forma individual indica que su efecto es más relevante cuando trabajan junto con otros microorganismos, donde potencia su acción con otros simbiontes. Por otro lado, el bajo porcentaje de grano comercializable en el

Testigo reafirma la importancia que es la inoculación microbiana para mejorar la calidad final del producto, aspecto clave en la aceptación comercial del grano.

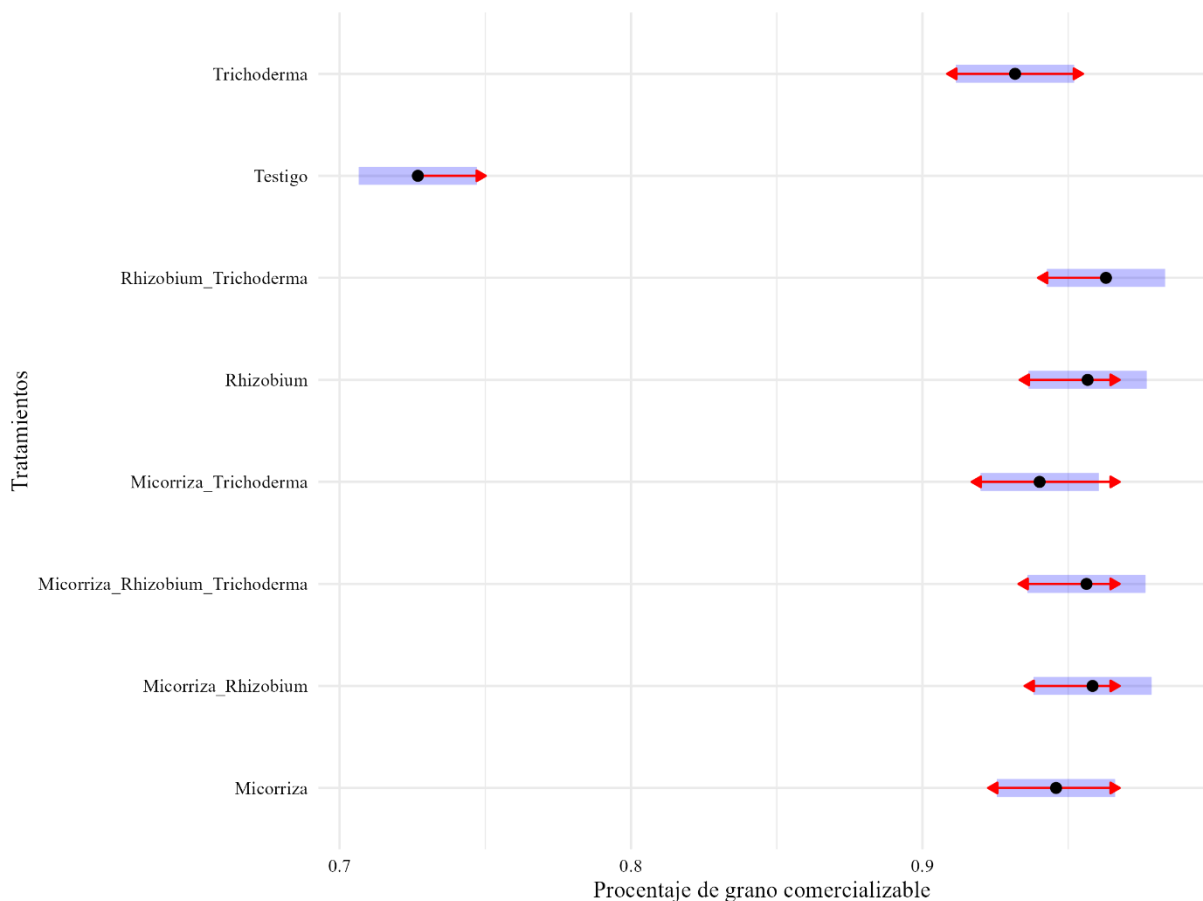


Figura 11. Comparación del porcentaje de grano comercializable por cada tratamiento evaluado

5.2.4 Rendimiento en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de frijol producido

Según Sobalvarro y Díaz, (2016), el rendimiento constituye una variable clave en cualquier cultivo, ya que refleja la eficiencia con la que las plantas usan los recursos disponibles en el suelo y cuanto potencial genético tienen. Al igual que con las demás variables, factores ambientales, genéticos y agronómicos, afectan esta variable.

Según Vizuite, (2022), cuando las precipitaciones están por debajo de las necesidades del cultivo, los rendimientos disminuyen drásticamente, especialmente si la falta de agua se da en la floración y el llenado de las vainas.

El análisis del modelo lineal mixto mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($F = 10.85$; $p < 0.0001$), indicando que la inoculación con los microorganismos tuvo un efecto en la productividad del cultivo.

Según estadísticas del Ministerio Agropecuario (MAG, 2025), el rendimiento promedio durante el ciclo productivo 2024/2025 estuvo entre 16 y 18 qq·ha⁻¹. Los rendimientos estimados reportados en este estudio superan el promedio nacional, incluso bajo las condiciones de trópico seco del municipio de El Sauce cuyo rendimiento promedio es inferior al Nacional. Por ejemplo, el tratamiento con *Rhizobium*+*T. harzianum* obtuvo el mayor rendimiento, con 1057.00 kg·ha⁻¹, seguido por Micorriza 1017.96 kg·ha⁻¹, y Micorriza+*T. harzianum* con 998.64 kg·ha⁻¹ (Figura 12). Aunque no hubo diferencias estadísticas entre estos últimos, todos superaron a Micorriza+*Rhizobium* (955.72 kg·ha⁻¹) y a Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* (965.46 kg·ha⁻¹). El tratamiento con *Rhizobium* rindió 933.23 kg·ha⁻¹ mostrando un valor intermedio. Por otro lado, *T. harzianum* produjo 531.02 kg·ha⁻¹ y el testigo, de lejos, obtuvo el valor más bajo con 151.74 kg·ha⁻¹ ($p < 0.0001$).

Los tratamientos Micorriza+*Rhizobium*, Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* y *Rhizobium* no presentan diferencias estadísticas frente a *T. harzianum*, mientras que *T. harzianum* y el Testigo conforman un grupo sin diferencias entre ellos.

La combinación de *Rhizobium*+*T. harzianum* logró el mayor rendimiento, gracias a su efecto complementario en la nutrición y sanidad de la planta. Según Ketta et al., (2021), esta combinación ayuda a reducir enfermedades como Damping-off y pudrición de raíces comunes en el cultivo de frijol, además de mejorar la fijación de nitrógeno, el número de nódulos y la biomasa aérea. Rudresh et al., (2020) también demostraron que esta inoculación conjunta favorece la absorción de nutrientes y el desarrollo de las raíces, sin que los microorganismos interfieran entre sí.

Estos beneficios inician con mecanismos complementarios, *Rhizobium* ayuda a la fijación simbiótica del nitrógeno, mientras que *T. harzianum* actúa como antagonista de hongos dañinos y como estimulador de crecimiento. Estudio como el de Gabre et al., (2020) confirmó que *T. harzianum* en combinación con *Rhizobium* incrementa significativamente el contenido de nitrógeno total y el peso seco de semillas, mientras que Das, (2023), destaca que *T. harzianum*

libera metabolitos que estimulan el crecimiento y la ramificación radicular, lo que potencia una mayor simbiosis microbiana.

El rendimiento asociado a *Rhizobium*+*T. harzianum* fue de 1057.00 kg·ha⁻¹, equivalentes a 23.2 qq·ha⁻¹ mostrando la eficiencia de este consorcio. Este comportamiento fue similar a lo reportado por Coaquira et al., (2020), quienes, en circunstancias ambientales más favorables, alcanzaron 1400 kg·ha⁻¹ bajo condiciones experimentales con la combinación de *Rhizobium*+*T. harzianum*.

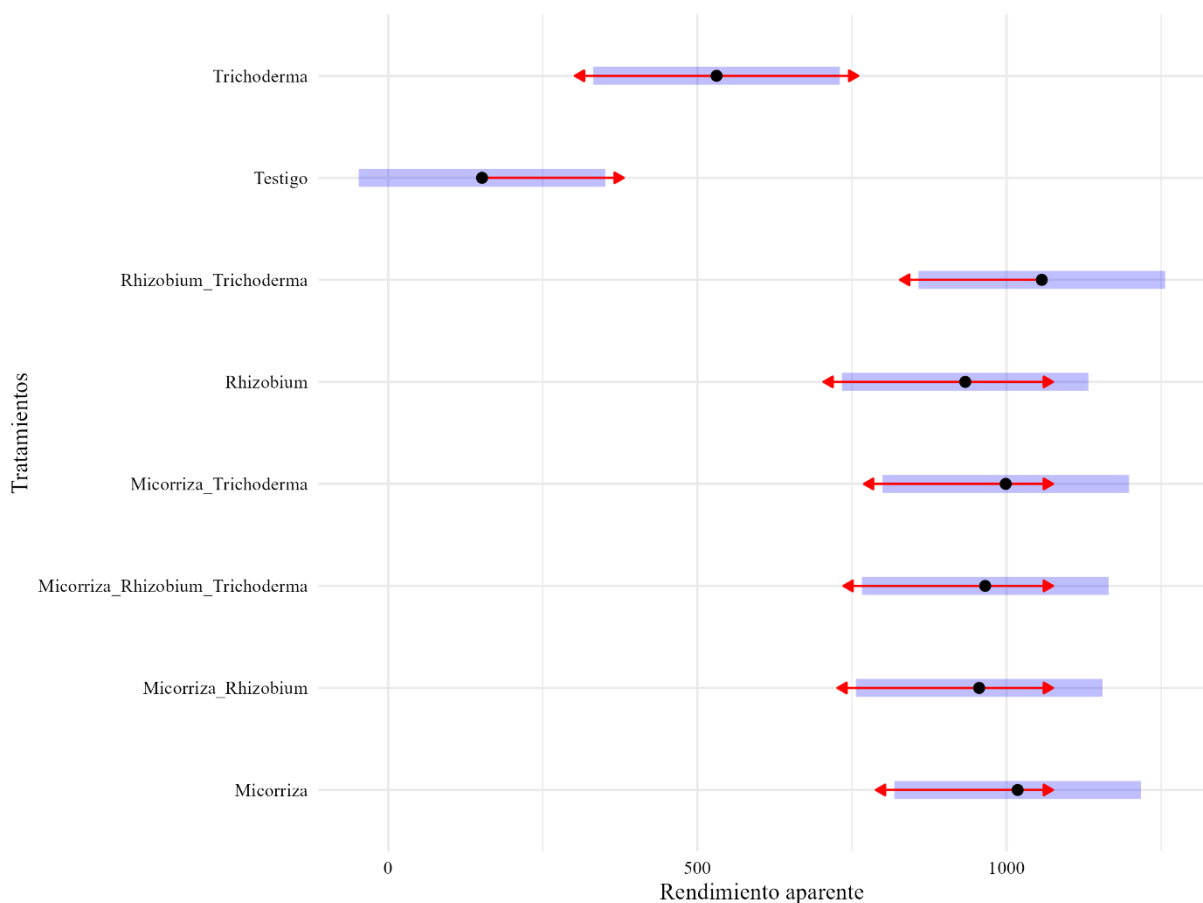


Figura 12. Comparación del rendimiento de grano kg/ha⁻¹ por cada tratamiento evaluado.

Los rendimientos superaron los promedios productivos de la zona (600 a 750 kg·ha⁻¹), excepto el tratamiento Testigo. Este comportamiento se debe a las condiciones climáticas adversas durante la etapa de campo del ensayo, especialmente en las fases reproductivas R5 a R9, cuando solo se registraron 12.1 mm de precipitación (Figura 13), frente a un requerimiento hídrico de 143.2 mm (Cuadro 4). Todos los tratamientos estuvieron expuestos al mismo déficit hídrico y a

temperaturas elevadas (33°C a 35°C), lo que afectó de manera la respuesta productiva del cultivo.

Sin embargo, los tratamientos inoculados mostraron mayor capacidad de resiliencia, logrando mantener el crecimiento y alcanzar rendimientos superiores al testigo, que, bajo las mismas condiciones, su respuesta fue significativamente inferior (151.74 kg·ha⁻¹). Este resultado muestra que, aun en escenarios de estrés hídrico y térmico, la inoculación favoreció la respuesta fisiológica del frijol, disminuyendo los efectos descritos por Urbina y Gudiel, (2022), quienes señalan que la falta de agua y altas temperaturas provocan aborto floral, vainas pequeñas, infertilidad del polen y disminución significativa en el rendimiento.

Por otro lado, durante las etapas vegetativas iniciales (V0 a V4), la lluvia acumulada fue de 188 mm, más del doble del requerimiento estimado para esa fase (85.1 mm), y las temperaturas oscilaron entre 28°C y 30°C, condiciones mucho más favorables para el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Aunque la precipitación acumulada alcanzó 200.1 mm, valor cercano al requerimiento total del cultivo 228 mm, su distribución no fue adecuada. Esta desincronización hídrica resalta el papel de los microorganismos inoculados como agentes mitigadores del estrés abiótico, ya que permitieron obtener mejores rendimientos incluso bajo condiciones climáticas adversas.

1 Cuadro 4. Requerimientos hídricos (mm) por etapa fenológica del cultivo de frijol.

Etapa	VO	V1	V2	V3	V4	R5	R6	R7	R8	R9
Duración días	0-5	5-7	7-11	11-16	15-23	23-32	32-36	36-44	44-62	62-77
Requerimiento por etapa mm	9.3	5.1	8	13.8	49.5	45.1	17.0	28.0	47.5	5.6
Total por fase mm	Fase vegetativa 85.7					Fase reproductiva 143.2				
Total del ciclo mm	228.0									

Fuente: Alemán y Calero, 2021.

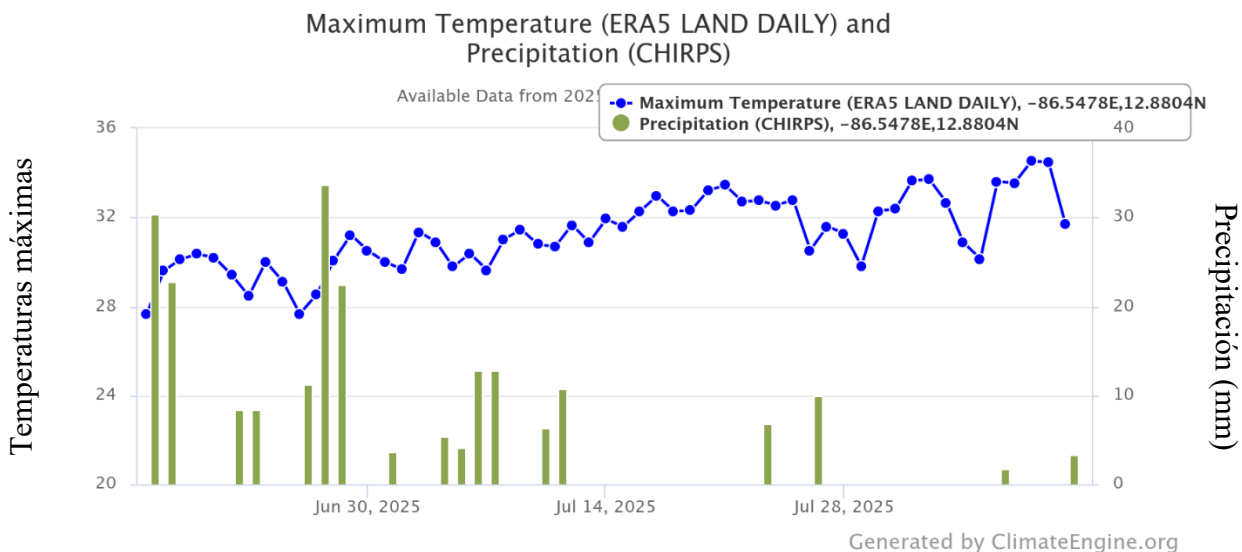


Figura 13. Temperaturas máximas y precipitaciones registradas durante el ensayo del cultivo de frijol en El Sauce, León. Fuente. Climate Engine.

5.3 Análisis económico

Con el propósito de brindar recomendaciones basado en criterios financieros, se realizó un análisis económico orientado a identificar la tecnología más rentable. Para ello, se siguió la metodología propuesta por CIMMYT (1988), la cual consiste en elaborar un presupuesto parcial, un Análisis de Dominancia y una Tasa de Retorno Marginal.

El presupuesto parcial, ayuda a comparar los costos variables y los ingresos netos que cada tratamiento puede generar. Para tener mayor precisión se ajustó el rendimiento experimental en un 10% menos para que se asemeje más a lo que el productor podría cosechar. Para saber cuánto se puede ganar, multiplicamos el rendimiento ajustado por el precio del frijol en el mercado durante la cosecha, el cual fue de C\$ 55 el kilogramo.

Los resultados, muestran que el tratamiento *Rhizobium*+*T. harzianum* produjo el mayor rendimiento ajustado, con 951.3 kg·ha⁻¹ y también el mayor ingreso bruto, de 52,321 kg·ha⁻¹, Gracias a esto, obtuvo el mayor ingreso neto, que fue de 50,642 C\$·ha⁻¹, aunque tuvo un costo variable intermedio de 1,679 C\$·ha⁻¹. Por otro lado, el tratamiento con Micorriza también tuvo una buena relación entre beneficios y costos, logrando un ingreso neto de 49,866 C\$·ha⁻¹ y un costo variable bajo, de 519 C\$·ha⁻¹ (Cuadro 5).

El Testigo, tuvo el menor rendimiento ajustado de $136.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y el menor ingreso bruto, de $7,507 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$. Los otros tratamientos, tanto individuales como combinados, mostraron resultados intermedios. Por ejemplo, *Rhizobium* generó un ingreso neto de $45,245 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$ y tuvo un costo variable de $949 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$, *T. harzianum* alcanzó un ingreso neto de $25,554 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$ y un costo variable de $730 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$, reflejando una rentabilidad limitada por su bajo rendimiento, de $477.9 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$.

Mientras que, el tratamiento Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* tuvo el costo variable más alto, de $2,198 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$, pero un ingreso neto de $45,591 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$, y las combinaciones Micorriza+*T. harzianum* y Micorriza+*Rhizobium* lograron ingresos netos de $48,179 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$ y $45,837 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente, con costos variables más bajos, de $1,249 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$ y $1,468 \text{ C}\$\cdot\text{ha}^{-1}$.

Este análisis muestra que la combinación *Rhizobium*+*T. harzianum* no solo mejora el rendimiento agrícola, sino que también resulta en la mejor relación beneficios costos, ya que ofrece la mayor eficiencia económica, al producir un retorno alto sobre la inversión de los microorganismos. El tratamiento Micorriza, con su bajo costo variable y un buen ingreso neto, se presenta como una opción de bajo riesgo para los productores. Aunque los tratamientos combinados con otros microorganismos también producen buenos resultados, sin embargo, su rentabilidad se reduce a causa del aumento de los insumos usados.

En el caso del Testigo confirma que no usar inoculantes pueden significar pérdidas en producción y ganancias. Destacando la importancia de las inoculaciones microbianas para mejorar la rentabilidad del cultivo de frijol de manera sostenible y accesible para pequeños productores.

Cuadro 5. Presupuesto parcial estimado de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Indicadores	Tratamientos evaluados							
	Mi	Rhi	Trich	Test	Mi+Trich	Rhi+Trich	Mi+Rhi	Mi+Rhi+Trich
Rendimiento obtenido (kg·ha ⁻¹)	1017.96	933.23	531.02	151.74	998.64	1057.00	955.72	965.46
Rendimiento ajustado al 10% (kg·ha ⁻¹)	916.1	839.9	477.9	136.5	898.7	951.3	860.1	868.9
Precio del kg (C\$·ha ⁻¹)	55	55	55	55	55	55	55	55
Ingreso bruto (C\$·ha⁻¹)	50,385	46,194	26,284	7,507	49,428	52,321	47,305	47,789
Costos variables (C\$·ha⁻¹) Microorganismos								
Cantidad de Micorriza (kg·ha ⁻¹)	0.709	-	-	-	0.709	-	0.709	0.709
Cantidad de <i>Rhizobium</i> (kg·ha ⁻¹)	-	0.997	-	-	0.997	0.997	0.997	0.997
Cantidad de <i>T. harzianum</i> (kg·ha ⁻¹)	-	-	0.997	-	-	0.997	-	0.997
Costos totales de Micorriza (C\$·ha ⁻¹)	519	-	-	-	519	-	519	519
Costos totales de <i>Rhizobium</i> (C\$·ha ⁻¹)	-	949	-	-	730	949	949	949
Costos totales de <i>T. harzianum</i> (C\$·ha ⁻¹)	-	-	730	-	-	730	-	730
Total, de costos variables (C\$·ha⁻¹)	519	949	730	-	1,249	1,679	1,468	2,198
Ingreso neto (C\$)	49,866	45,245	25,554	7,507	48,179	50,642	45,837	45,591

Mi: Micorriza, Rhi: *Rhizobium*, Trich: *T. harzianum*, Test: Testigo, Mi+Trich: Micorriza+*T. harzianum*, Rhi+Trich: *Rhizobium*+*T. harzianum*, Mi+Rhi: Micorriza+*Rhizobium*, Mi+Rhi+Trich: Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum*

5.4 Análisis de dominancia

El análisis de dominancia consiste en ordenar los tratamientos de acuerdo con sus costos variables, desde el más bajo hasta el más alto, con el fin de identificar aquellos que pueden considerarse dominados. Un tratamiento se considera dominado cuando sus costos variables son mayores y sus beneficios netos iguales o inferiores al de otro tratamiento con menor costo variable (CIMMYT, 1988). Posteriormente, para los tratamientos no dominados, se estimó la tasa de retorno marginal como el cociente entre los beneficios netos y los costos variables.

El análisis de dominancia presentado en el cuadro 6 revela que los tratamientos Micorriza y *Rhizobium*+*T. harzianum* no están dominados, lo que indica que ofrecen una mejor relación entre costos variables e ingresos netos. Estos tratamientos representan opciones viables para productores que buscan maximizar beneficios sin incurrir en incremento de costos.

En cambio, los tratamientos *T. harzianum*, *Rhizobium*, Micorriza+*Rhizobium*, Micorriza+*T. harzianum* y Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum* están clasificados como dominados. Esto significa que, aunque algunos de ellos generan ingresos netos relativamente altos, sus costos variables son superiores a los de otros tratamientos que logran beneficios iguales o mayores, lo que los hace menos eficientes desde el punto de vista económico.

El tratamiento Testigo, caracterizado por un costo variable nulo, genera ingresos netos relativamente bajos en comparación con los tratamientos que incorporan bioinsumos. Sin embargo, al no presentar costos asociados, se mantiene dentro del grupo no dominados. Esta condición metodológica lo convierte en un punto de referencia, pues permite comparar el efecto de las tecnologías evaluadas frente a una práctica sin inversión. No obstante, su baja rentabilidad limita su viabilidad como opción productiva, ya que, aunque asegura un margen positivo por ausencia de costos, no contribuye de manera significativa a mejorar la competitividad ni la sostenibilidad del sistema de producción.

El tratamiento Micorrizas representan una alternativa económicamente accesible para pequeños productores con recursos limitados, ya que combinan bajos costos variables con ingresos netos competitivos. Por otra parte, el tratamiento combinado *Rhizobium*+*T. harzianum* genera el mayor ingreso neto entre todos los tratamientos evaluados, mostrando su superioridad productiva. Sin embargo, esta ventaja implica un incremento en los costos variables debido al

precio de los insumos requeridos para la doble inoculación, lo cual podría limitar su adopción por parte de productores con restricciones económicas.

Cuadro 6. Análisis de dominancia de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Tratamientos	Costos variables (C\$·ha ⁻¹)	Ingreso neto (C\$)	Dominancia
Testigo	0	7,507	ND
Micorriza	519	49,866	ND
<i>T. harzianum</i>	730	25,554	D
<i>Rhizobium</i>	949	45,245	D
Mico+Tricho	1,249	48,179	D
Mico+Rhizo	1,468	45,837	D
Rhizo+Tricho	1,679	50,642	ND
Mico+Rhizo+Tricho	2,198	45,591	D

Testigo, Micorriza, *T. harzianum*, *Rhizobium*, Mico+Tricho: Micorriza+*T. harzianum*, Mico+Rhizo: Micorriza+*Rhizobium*, Rhizo+Tricho: *Rhizobium*+*T. harzianum*, Mico+Rhizo+Tricho: Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum*. D: Dominado; ND: No dominado

5.5 Tasa de retorno marginal

Se utilizaron los tratamientos Testigo, Micorriza, *Rhizobium*+*T. harzianum*, para estimar la tasa de retorno marginal y evaluar la rentabilidad económica. El cuadro 7 da a conocer que el tratamiento Micorriza fue el más rentable, ya que presentó una tasa de retorno marginal de 8,162%, seguido del tratamiento *Rhizobium*+*T. harzianum* con una tasa de retorno de 67%. Estos resultados indican que, por cada Córdoba invertido, el productor puede esperar recobrar el C\$ 1.0 y obtener C\$ 81.62 si optara por el tratamiento Micorriza o bien C\$ 0.67, si optara por el consorcio *Rhizobium*+*T. harzianum*.

El tratamiento Micorriza fue el que obtuvo un mejor resultado, no obstante, es importante no menospreciar el efecto de los demás tratamientos, ya que es probable que las condiciones climatológicas en las que se estableció la investigación hayan disminuido la eficiencia de estos microorganismos, Aun así, el uso de consorcios microbianos tuvo un buen desempeño sobre las variables de crecimiento y rendimiento del cultivo de frijol.

Cuadro 7. Tasa de Retorno Marginal de los tratamientos evaluados en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Tratamientos	Costos variables (C\$·ha ⁻¹)	Ingreso Neto (C\$)	Costo variable marginal (C\$·ha ⁻¹)	Beneficio neto marginal (C\$·ha ⁻¹)	TRM (%)	TRM C\$
Testigo	0	7,507	-	-	-	-
Micorriza	519	49,866	519	42,359	8,162	81.62
<i>Rhizobium</i> + <i>T. harzianum</i>	1,679	50,642	1160	776	67	0.67

VI. CONCLUSIONES

El cultivo de frijol inoculado con microorganismos promotores de crecimiento mostró incrementos significativos en las variables de crecimiento, rendimiento y calidad del grano, especialmente en los tratamientos con Micorriza, *Rhizobium* y consorcios microbianos. Estos efectos se atribuyen a la activación de mecanismos fisiológicos que favorecen la síntesis de fitohormonas, el desarrollo vegetativo y reproductivo, así como la absorción de nutrientes, agua y la fijación biológica de nitrógeno.

Por otra parte, la inoculación individual con *T. harzianum* no generó incrementos significativos en crecimiento ni rendimiento, dado que su función principal se orienta a la supresión de fitopatógenos mediante parasitismo y antibiosis, además de competir por espacio y nutrientes en el suelo. Sin embargo, al integrarse en consorcio con otros microorganismos, su acción antagonista se complementó con mecanismos de promoción del crecimiento, contribuyendo de manera significativa al desarrollo y productividad del cultivo.

En síntesis, el uso de microorganismos promotores de crecimiento en el cultivo de frijol se valida como una estrategia de resiliencia frente a condiciones adversas y como una alternativa eficaz de mitigación ante los efectos del cambio climático. Su aplicación reduce la dependencia de insumos químicos, disminuye costos de producción, mitiga la contaminación de los sistemas agrícolas y mejora la rentabilidad del cultivo. Los resultados de este estudio constituyen evidencia científica robusta sobre el potencial de estos bioinsumos para fortalecer la sostenibilidad y competitividad de los sistemas productivos locales, aportando bases sólidas para su adopción en la agricultura de la región.

VII. RECOMENDACIONES

Desde la perspectiva técnica y económica, y bajo las condiciones en las que se desarrolló el experimento, la opción más recomendable para los productores es utilizar el tratamiento Micorriza en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Se recomienda repetir este estudio, tanto en la localidad donde fue realizado como en otras zonas de Nicaragua, especialmente en los municipios del corredor seco. De esta manera, los resultados podrán ser validados o refutados bajo diferentes condiciones edafoclimáticas, lo que permitirá determinar con mayor precisión la eficacia de los microorganismos inoculados y su potencial de adaptación en diversos sistemas agrícolas del país.

VIII. LITERATURA CITADA

- Achicanoy, V., Reyes, B., y Wiegel, J. (2024). Producción, distribución y consumo de frijol común en Centroamérica: perspectivas actuales. *Initiative on Rethinking Food Markets*, 4(10). <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/6804966b-a7dd-4e5c-812b-1842f93e01a7/content>
- Aguilera Gómez, L. I., Olalde Portugal, V., Arriaga, M. R., y Contreras Alonso, R. (2007). Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 300-306. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10414307.pdf>
- Alemán Martínez, M. R., y Calero Narváez, L. A. (2021). *Fertilización orgánica y sintética en el crecimiento y rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L) en Masatepe, Masaya* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/4536/1/tnf04a367f.pdf>
- Álvarez Ruiz, A. F. (2022). *Fijación biológica de nitrógeno en tres variedades mejoradas de frijol común (Phaseolus vulgaris L.) por el método de dilución isotópica de ^{15}N en condiciones de invernadero* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/4496/1/tnp34a473f.pdf>
- Alves, G., Ineichen, K., Javier, P., Ewald, S., y Oehl, F. (2011). Advances in *Glomeromycota* taxonomy and classification. *IMA Fungus*, 2(2), 191–199. <https://link.springer.com/content/pdf/10.5598/imafungus.2011.02.02.10.pdf>
- Andrade Hoyos, P., Rivera Jiménez, M. N., Ladero Valenzuela, N., Silva Rojas, H. V., Martínez Salgado, S. J., y Romero Arenas, O. (2023). Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma spp* en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología*, 55(4). <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.005>
- Andrade Torres, A. (2010). Micorrizas; antigua interacción entre plantas y hongos. *Revista Ciencia*, 5. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_4/PDF/11_MICORRIZAS.pdf
- Argumedo Delira, R., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., y Peña Cabriales, J. J. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(4), 257-269. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n4/v25n4a6.pdf>
- Ballesteros, M., Duran, D., Domínguez, D., Albareda, M., y Palacios, J. (2018). *Análisis de la adaptación de la fase endosimbiótica de Rhizobium leguminosarum* [Ponencia en congreso MIP 2017, Salamanca, Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/50995/1/INVE_MEM_2017_276980.pdf

- Banco Central de Nicaragua. (2024). *Informe anual 2023*. Banco Central de Nicaragua. <https://www.bcn.gob.ni/publicaciones/informe-anual-2023#:~:text=As%C3%AD%2C%20el%20Producto%20Interno%20Bruto>
- Barbosa Reséndiz, A., Valenzuela, R., Sánchez Flores, M., Bautista Hernández, S., Cobos Villagrán, A., Pérez Valdespino, A., Rosario Mellado, M. E., Martínez Pineda, M., y Raymundo, T. (2020). El género *Daldinia* (*Sordariomycetes, Ascomycota*) en México. *Acta Botánica Mexicana*, 127(1600). <https://abm.ojs.inecol.mx/index.php/abm/article/view/1600/4115>
- Bates, D., Machler, M., Bolker, B. M., Y Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4 [Ajuste de modelos lineales de efectos mixtos con lme4]. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/JSS.V067.I01>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., y Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance [Papel de los hongos micorrízicos arbusculares en la regulación del crecimiento vegetal: implicaciones en la tolerancia al estrés abiótico]. *Frontiers in Plant Science*, 10(1068). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Berrios Reyes, A. I., y Carvajal Alonso, A. A. (2005). *Validación de cuatro variedades de frijol rojo, bajo diferentes tipos de fertilización en el Campus Agropecuario UNAN-León 2005* [Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma de Nicaragua-UNAN LEÓN]. Repositorio Institucional. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/940>
- Bizos, G., Papatheodorou, E. M., Chatzistathis, T., Ntalli, N., Aschonitis, V., y Monokrousos, N. (2020). The role of microbial inoculants on plant protection, growth stimulation, and crop productivity of the Olive Tree (*Olea europea* L.) [El papel de los inóculos microbianos en la protección vegetal, estimulación del crecimiento y productividad del cultivo del olivo (*Olea europea* L.)]. *Plants*, 9(746). <https://doi.org/10.3390/PLANTS9060743>
- Bravo, Flores, G. F., y Chavarría Rivera, D. A. (2021). *Evaluación de un sustrato artesanal para la producción de Rhizobium en el cultivo de frijol, en Centro Nacional de Investigación Agropecuaria INTA-CNIA* [Monografía de ingeniería, Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua]. Repositorio Institucional. <https://ribuni.uni.edu.ni/4405/1/96030.pdf>
- Calero, A., Pérez, Y., Quintero, E., Olivera, D., y Peña, K. (2019). Efecto de la aplicación asociada entre *Rhizobium leguminosarum* y microorganismos eficientes sobre la producción del frijol común. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2). https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL20_NUM2_ART:1460
- Castillo Basaldúa, I. Y. (2016). Las bacterias, estudios y cambios a lo largo de la historia. *Revista digital Universitaria*, 17(5). <https://www.revista.unam.mx/vol.17/num5/art38/art38.pdf>

- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1988). *From agronomic data to farmer recommendations: An economics training manual* México [De los datos agronómicos a las recomendaciones para los agricultores: Un manual de capacitación en economía. México]. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/f180cf81-98cd-4c02-a538-1eac4382dfcc/content>
- Choi, J., Summers, W., y Paszkowski, U. (2018). Mechanisms underlying establishment of arbuscular mycorrhizal symbioses [Mecanismos subyacentes al establecimiento de simbiosis micorrízicas arbusculares]. *Annual Review of Phytopathology*, 56(1). <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-phyto-080516-035521>
- Coaquira Llanos, F. M., Huaranga, J. A., y Juscamaita Morales, J. (2020). Inoculación con *Rhizobium spp*, *Trichoderma spp* y aplicación de biofertilizantes sobre el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agroecología Caminho de Preservação do Medio Ambiente* 2(4), 107-116. <https://doi.org/10.22533/AT.ED.16220290413>
- Corbera Gorotiza, J, Y Nápoles García, M. C. (2022). Study of Bradyrhizobium strains and mycorrhizal application on soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) [Estudio de cepas de Bradyrhizobium y aplicación micorrízica en soja (*Glycine max* (L.) Merrill)]. *Cultivos Tropicales* 43(3). <https://cu-id.com/2050/v43n3e03>
- Corbera Romero, Y. L., Santana Baños, Y., Y Miranda Izquierdo, E. (2021). Efecto de la inoculación de *Rhizobium* sobre el crecimiento de *Phaseolus vulgaris* (frijol) en condiciones semi controladas. *Revista scientific Advances*, 19(1). <https://www.redalyc.org/pdf/6378/637867024001.pdf>
- Das, A. (2023). *Management of soil borne diseases of pulses (Greengram) using native Trichoderma isolates* [Manejo de enfermedades transmitidas por el suelo de las legumbres (Greengram) utilizando aislamientos nativos de *Trichoderma*] [Tesis de doctorado, Universidad de Agricultura]. Repositorio Institucional. <https://krishikosh.egranth.ac.in/server/api/core/bitstreams/1953d0b2-5224-4179-81c1-cfd54a6cc0d5/content>
- Delgado Álvarez, A., Rivera Espinoza, R. A., y Martín Cárdenas, J. V. (2024). Coinoculation of *rhizobia* and arbuscular mycorrhizal fungi in two common bean cultivars [Coinoculación de rizobios y hongos micorrízicos arbusculares en dos cultivares comunes de frijol]. *Cultivos Tropicales*, 45(4). <https://cu-id.com/2177/v33n4e09>
- Delgado Silva, H. D., y Gutiérrez Montoya, L. V. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 2–14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>

- Espinoza Lozano, R. F. (2013). *Evaluación de tres cepas de Trichoderma para el control de Fusarium oxysporum en el cultivo de maracuyá Pasiflora edulis var flavicarpa* [Tesis de ingeniería, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1548/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-25.pdf>
- Ferguson, S., Major, A. S., Sullivan, J. T., Bourke, S. D., Simon, J. K., Perry, B. J., y Ronson, C. W. (2020). *Rhizobium leguminosarum* by trifolin nodd2 enhances competitive nodule colonization in the clover-rhizobium symbiosis [*Rhizobium leguminosarum* por trifolin nodd2 mejora la colonización competitiva de nódulos en la simbiosis trébol-rizobio]. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18). <https://journals.asm.org/doi/epub/10.1128/aem.01268-20>
- Fernandez, L. V. (2001). Microorganismos antagonistas para el control de pathogens. *Avances en el Fomento de Productos Fitosanitarios No-Sintéticos*, 62(4), 96-100. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6578/A2120e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Flores Córdova M. A., Matas Baca, M. A., Pérez Álvarez, S., Rodríguez Roque, M. J., Salas Salazar, N. A., Soto Caballero, M. C., y Sánchez Chávez, E. (2022). Hongos *Trichoderma harzianum* como control biológico agrícola en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 29(3), 79-114. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v29n3/2007-4034-rcsh-29-03-79.pdf>
- Flores Pacheco, J. A., Lazo Sánchez, W. J., y Méndez Sevilla, J. J. (2019). Necesidades hídricas del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) INTA rojo en condiciones del trópico húmedo de Nicaragua. *La Calera*, 19(32). <https://doi.org/10.5377/calera.v19i32.8436>
- Franken, P., Donges, A., Grunwald, U., Kost, G., Rexer, K., Tamasloukht, M., Waschke, A., y Zeuske D. (2007). Análisis de la expresión génica del desarrollo y funcionamiento de los arbusculos. *Revista internacional Phytochemistry*, 68(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031942206005942#preview-section-cited-by>
- Gabre, V., Venancio, S., Morales, A., Goles F., Galvao, W., Gonçalves, P., y Etto, M. (2020). Multiple effects of different plant growth promoting microorganisms on beans (*Phaseolus vulgaris* L) [Efectos múltiples de diferentes microorganismos promotores del crecimiento vegetal en frijol (*Phaseolus vulgaris* L)]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 63(20), 1–11. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-solo-2020190493>
- Gallego Arjona, E. (2016). Los hongos y el paso del tiempo. *Revista Eubacteria*, 36(5). https://www.um.es/eubacteria/Los_hongos_y_el_paso_del_tiempo.pdf
- Gómez Díaz, D., Medina Agüero, M., Pérez Rodríguez, Y., Porres García, M. A., Barcia Sardiñas, S., y Viera González, E. Y. (2024). Zonificación edafoclimática de (*Phaseolus vulgaris* L).

- en la provincia de Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(4). <https://www.redalyc.org/journal/7019/701981084009/701981084009.pdf>
- González Marquetti, I., Martínez, D. Y., Gorrita, S., Morales Mena, B., Nápoles, M. C., Delgado Oramas, B. P., y Martínez Coca, B. (2021). Efectos de *Trichoderma asperellum* y *Azofert* sobre el crecimiento y desarrollo de (*Phaseolus vulgaris* L). *Revista de Protección Vegetal*, 36(3). <https://www.censa.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/1171/1941>
- González, B., Arizmendi, G., y Velasco, R. (2019). *Trichoderma*: su potencial en el desarrollo sostenible de la agricultura. *Biotecnología Vegetal*, 19(4). <http://ref.scielo.org/j4sq54>
- González, R. L., Núñez Sosa, D. B., y Díaz, R. B. (2012). Efecto de la aplicación de *Rhizobium* y Micorriza en el crecimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L) variedad CC-25-9 negro. *Centro Agrícola*, 39(4). <https://biblat.unam.mx/hevila/Centroagricola/2012/vol39/no4/3.pdf>
- Hernández Melchor, D. J., Ferrera Cerrato, R., y Alarcón, A. (2019). *Trichoderma* importancia agrícola, biotecnología y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean journal of agricultural y animal sciences*, 35(1). https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-38902019000100098
- Hidalgo, R., y Moran Caicedo, I. A. (2020). *Trichoderma*: hongo fungicida usado en tratamientos foliares del suelo y el control de diversas enfermedades producidas por hongos. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 7(4). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9037959>
- Hoyos Carvajal, L., Cardona, A., Osorio, W., y Orduz, A. (2016). Efecto de diversos aislamientos de *Trichoderma spp* en la absorción de nutrientes en frijol (*Phaseolus vulgaris*) en dos tipos de suelo. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 9(2), 268-27 https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/4183/pdf
- Hurtado, A., Pérez, D., Quintero, E., Olivera, V., y Peña, C. (2019). Efecto de la aplicación asociada entre *Rhizobium leguminosarum* y microorganismos eficientes sobre la producción del frijol común. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 295-322. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1460
- Icazbalceta, J. L., Chavarría Araica, S. L., y Ortez Lanzas, R. J. (2023). Un análisis de las estrategias utilizadas en 2022 por los comerciantes de frijoles (*Phaseolus vulgaris*) al detalle para garantizar la rentabilidad en la ciudad de Matagalpa, Nicaragua. *Revista Científica Tecnológica Recientec*, 6(3), 21-28. <https://revistas.unan.edu.ni/index.php/ReVTec/es/article/view/3643/5926>

- Infante, D., Martínez, B., González, N., y Reyes, Y. (2009). Mecanismo de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos. *Revista de Protección Vegetal*, 24(1). <https://censa.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/542/670>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2025). *Boletín climático mensual: Julio 2025*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Nicaragua. <https://www.ineter.gob.ni/boletines/Boletin%20climatico/mensual/2025/BoletinClimatico072025.pdf>
- Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2024). *Resultados de evaluación del uso de inoculantes biológicos en la producción del cultivo del frijol*. Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, Nicaragua. <https://inta.gob.ni/resultados-de-evaluacion-del-uso-de-inoculantes-biologicos-en-la-produccion-del-cultivo-del-frijol/>
- Izurietta Cherrez, E. L. (2021). *Sensibilidad invitro de especies de Trichoderma spp aisladas de suelos forestales a funguicidas de diferentes modos de acción* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba]. Repositorio Institucional. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/b3abed74-11c8-40f7-84c9-55d75929d4b9/content>
- Jiménez Nieto, N. (2022). *Simbiosis entre Rhizobium y leguminosas para la mejora de la calidad de los suelos frente a situaciones adversas* [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/30ab716c-e0ab-41bd-9458-6b890c808906/content>
- Jiménez, P., Sieverding, E., y Oehl, F. (2011). Avances en la taxonomía y clasificación de *Glomeromycota*. *Ima Fungus, The Global Mycological Journal* 2(2). https://www.researchgate.net/publication/233742255_Advances_in_Glomeromycota_taxonomy_and_classification
- Ketta, H. A., Nagwa, M. E., Mona, M. S., y Kamel D. M. (2021). Efficiency assessment of combinations between *Rhizobium leguminosarum* and *Trichoderma spp.* for controlling of pea (*Pisum sativum* L.) damping-off disease said m. Kamel [Evaluación de la eficiencia de combinaciones de *Rhizobium leguminosarum* y *Trichoderma spp.* para el control de la enfermedad del marchitamiento del guisante (*Pisum sativum* L.)]. *Egyptian Journal of Phytopathology*, 49(1), 1–14. <https://doi.org/10.21608/ejp.2020.43495.1007>
- Khair, H., y Nasr, I. (2018). Field application of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* combined with *Rhizobium* for controlling *Fusarium* root in Faba bean in organic farming [Aplicación en campo de *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* combinados con *Rhizobium* para el control de la raíz de *Fusarium* en haba en agricultura ecológica]. *Journal*

- Lenth, R. V., Piaskowski, J., Banfai, B., Bolker, B., Buerkner, P., Gine Velazquez, I., Hervé, M., Jung, M., Miguez, F., Riebl, H., y Sigmann, H. (2017). *Emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means* [Emmeans: medias marginales estimadas, también conocidas como medias de mínimos cuadrados] (Paquete de software R). CRAN: Contributed Packages. <https://doi.org/10.32614/CRAN.PACKAGE.EMMEANS>
- León Barrios, M. (2013). *La simbiosis rizobios-leguminosa. Árboles fijadores de nitrógeno y su importancia en los ecosistemas* [Ponencia en congreso, Jornadas Forestales de Gran Canaria]. Repositorio Institucional. <https://jornadasforestalesdegrancanaria.com/wp-content/uploads/2019/10/Milagros-Leon-Brito-La-simbiosis-rizobio-leguminosa.pdf>
- López Maqueira, L. A., Roján Herrera, O., Solano Flores, J., Santana Ges, I. M., y Fernández Márquez, D. (2021). Productividad del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), rendimiento en función de variables meteorológicas. *Cultivos Tropicales*, 42(3). <http://ref.scielo.org/5r68sd>
- López Sarmiento, L. G., y Rodríguez Monroy, M. (2021). La simbiosis entre hongos y plantas, un ejemplo de colaboración y beneficio mutuo. *Academia de Ciencias de Morelos*. <https://www.acmor.org/publicaciones/la-simbiosis-entre-hongos-y-plantas-un-ejemplo-de-colaboraci-n-y-beneficio-mutuo>
- Maclean, A. M., Bravo, A., y Harrison, M. J. (2017). Señalización de plantas y vías metabólicas que permiten la simbiosis micorrícica arbusculares. *The Plant Cell*, 29(10), 2319-2335. <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555>
- Marcondes Souza, J. A. (2014). The family *Rhizobiaceae* [La familia *Rhizobiaceae*]. *Springer Nature Link*. https://www.researchgate.net/publication/275829832_The_Family_Rhizobiaceae
- Márquez Benavidez, L., Rizo León, M. A., Montañó Arias, N. M., Ruiz Nájera, R., y Sánchez Yáñez, J. M., (2017). Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la inoculación de diferentes dosis de *Trichoderma harzianum* con el fertilizante nitrogenado reducido al 50%. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 8(2). http://scielo.org.bo/pdf/jsars/v8n2/v8n2_a06.pdf
- Masson Boivin, C., Giraud, E., Perret, X., y Batut, J. (2009). Establecer una simbiosis fijadora de nitrógeno con las legumbres: cuántas recetas de rizobios. *Trends in Microbiology*, 17(10), 458-466. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2009.07.004>
- Medina Flores, R. C., Bárcenas, M. J., Sánchez Miranda, M. D., Lagos Morales, A. T., y Aquino Jiménez, M. (2023). Evaluación del potencial de hongos micorrizas y bacterias *Rhizobium*

- en el desarrollo fenológico y rendimiento del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*). *Revista Científica nexo*, 36(06). <https://doi.org/10.5377/nexo.v36i06.17436>
- Medina Portilla, N. F. (2022). *Caracterización morfológica de 50 accesiones del germoplasma de frijol (Phaseolus vulgaris) en el valle de chincha* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional. https://repositorio.unjpsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/6907/NICANOR%20FRANCISCO%20MEDINA%20PORTILLA_compressed.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio Agropecuario (MAG). (2025). *Ciclo agrícola 2024-2025 reportó la siembra de 122,742 manzanas de frijol rojo*. <https://www.mag.gob.ni/index.php/noticias?view=article&id=323:ciclo-agricola-2024-2025-reportan-la-siembra-de-122-742-manzanas-de-frijol-rojo&catid=11>
- Molina Ferriol, M. (2023). Generalidades sobre los hongos verdaderos reino Fungi [Revisión bibliográfica, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/194684/Ferriol%20-%20Generalidades%20sobre%20los%20hongos%20verdaderos%20reino%20Fungi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montero Tavera, V., Gutiérrez Benicio, G. M., Mireles Arriaga, A. I., Aguirre Mancilla, C. L., Acosta Gallegos, J. A., y Ruiz Nieto, J. E. (2019). Efectos fisiológicos del estrés hídrico en variedades de frijol tolerantes a la sequía. *Acta universitaria* 19(1). <https://www.redalyc.org/journal/416/41659210009/41659210009.pdf>
- Monzón, J., Bullor, L., Braudel, H., Cotes Prado, A. M., Casavola, V., Carbajal Morón, N., y Risopoulos, J. (2023). Bioinsumos oportunidades de inversión en america latina. *Dirección de inversión de la FAO*, 5(9). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6f0feb21-441d-4662-aed5-03085a951d90/content>
- Murali Sankar, P., y Maheshwari, P. (2023). Enfoques independientes y dependientes del cultivo en el análisis de simbiontes. *Revista Microbial Symbionts*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323993340000189#preview-section-abstract>
- Murillo, F. (2023). *Evaluación del ciclo productivo de (Phaseolus vulgaris L.), inoculado con biofertilizantes* [Revisión bibliográfica, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/9747/1/UPSE-TIA-2023-0012.pdf>
- Nápoles García, M. C., Cabrera Pino, J. C., Onderwater, R., Wattiez, R., Hernández Forte, I., Martínez González, L., y Núñez Vázquez, M. (2016). Señales producidas por *Rhizobium leguminosarum* en la interacción con frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Instituto*

- Nava Galicia, S., Flores Gonzáles, A. E., Cortés Espinoza, D. V., y Bibbins Martínez, M. (2025). Inoculantes microbianos: los grandes aliados en la agricultura sostenible. *Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada*, 31(3).
<https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol31/pdf/vol-31L-1.pdf>
- Paredes, J., Carrillo, J., Sañudo, J., Molar1, R., García, R., y Labavitch, J. (2011). Enzimas líticas producidas por *Trichoderma spp.* y su correlación con la inhibición in vitro de patógenos causantes de la pudrición de la raíz del garbanzo. *Revista mexicana de fitopatología*, 29(1).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092011000100008&form=MG0AV3
- Perdomo González, M. A. (2022). *Establecimiento de un cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris) variedad bolo rojo con el fin de comercialización en grano seco y como alternativa productiva de transferencia de conocimientos técnicos a los productores del municipio de Palermo Hui* [Trabajo de grado, Universidad de la Salle]. Repositorio Institucional.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/02254b74-2251-4fa7-a59e-f6f365135a61/content>
- Pinzón Junca, A. (2019). *Pseudomonas*. *Acta Médica Colombiana*, 44(1).
<https://www.actamedicacolombiana.com/ojs/index.php/actamed/article/view/1370/362>
- Polanco Norori, F. y Vanegas Acuña, M. (2021). *Efecto de la inoculación con rizobios y micorrizas sobre el crecimiento, rendimiento y la rentabilidad del cultivo de frijol común (Phaseolus vulgaris L.), Sabana Grande, Managua, 2021* [Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Agraria, Nicaragua]. Repositorio Institucional.
<https://repositorio.una.edu.ni/4642/1/tnf04p762.pdf>
- Polón Pérez, R., Ruiz Sánchez, M., Miranda Caballero, A., y Ramírez Arrebató, M. A. (2017). Effects of water stress on grain yield in the vegetative phase of bean cultivation (*Phaseolus vulgaris* L.). [Efectos del estrés hídrico sobre el rendimiento de grano en la fase vegetativa del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)]. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(1). <https://www.redalyc.org/pdf/932/93249689008.pdf>
- Posit team. (2025). *RStudio: Integrated development environment for R* [RStudio: Entorno de desarrollo integrado para-R] (Software). Posit Software, PBC.
<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>

- Ramírez Gómez, M., y Rodríguez, A. (2012). Mecanismos de defensa y respuestas de las plantas en la interacción micorrícica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752012000100025
- Reyes Matamoros, J., Martínez Moreno, D., Rueda Luna, R., y Rodríguez Ramírez, T. (2014). Efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(2). <https://www.reibci.org/publicados/2014/julio/2200132.pdf>
- Rudresh, D. L., Shivaprakash, M. K., y Prasad, R. D. (2005). Effect of combined application of *Rhizobium*, phosphate solubilizing bacterium and *Trichoderma spp* on growth, nutrient uptake, and yield of chickpea (*Cicer aritenium* L.) [Efecto de la aplicación combinada de *Rhizobium*, bacteria solubilizadora de fosfato y *Trichoderma spp* sobre el crecimiento, la absorción de nutrientes y el rendimiento del garbanzo (*Cicer aritenium* L.)]. *Applied Soil Ecology*, 28(2), 139–146. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2004.07.005>
- Rugama Arauz, J. J. (2021). *Evaluación de diferentes fertilizantes en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.), variedad rojo-extrema sequía, centro experimental las Mercedes, 2020* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/4420/1/tnf04r928g.pdf>
- Saba, H., Vibhash, D., Manisha, M., Prashant, S., Farhan, H., Tauseef, A. (2012). *Trichoderma* promising plant growth stimulator and biocontrol agen [*Trichoderma*, prometedor estimulador del crecimiento vegetal y agente de biocontrol]. *Amity Institute of Biotechnology*, 3(4). <https://doi.org/10.5943/mycosphere/3/4/14>
- Sáenz Chauca, V. L. (2002). *Evaluación y caracterización de cuatro inoculantes comerciales de micorrizas en frijol (Phaseolus vulgaris L.), pasto tanzania (Panicum maximum Jacq) y pasto transvala (Digitaria decumbens Stent)* [Tesis de ingeniería, Zamorano, Honduras]. Repositorio Institucional. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/65a5ef3f-d75c-4538-b095-a52c165baf02/content>
- Salgado Canales, J. A., y Salgado Canales, M. D. (2017). *Germinación de la semilla de marango (Moringa oleifera Lam.) a diferentes edades y aplicación de tratamientos pregerminativos* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/3455/1/tnk10s164g.pdf>
- Salmerón, I. A., Pedraza, M. E., Mendoza Oviedo, L. S., y Chávez Bárcenas, A. T. (2015). Cronología de la taxonomía y cladística de los glomeromicetos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2). <https://scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n2/v38n2a5.pdf>

- Sarmiento López, L. G., López Meyer, M., Jiménez Supúlveda, G., Cárdenas, L., y Rodríguez Monroy, M. (2021). Arbuscular mycorrhizal symbiosis in stevia rebaudiana increases trichome development, flavonoid, and phenolic compound accumulation [La simbiosis micorrízica arbuscular en *stevia rebaudiana* aumenta el desarrollo de tricomas y la acumulación de flavonoides y compuestos fenólicos]. *Revista Biocatálisis y biotecnología agrícola*, 31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818120319204>
- Schmitz, A. M., y Harrison, M. J. (2014). Signaling events during initiation of arbuscular mycorrhizal symbiosis [Eventos de señalización durante el inicio de la simbiosis micorrízica arbuscular]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(3). <https://doi.org/10.1111/jipb.12155>
- Schubler, A., y Walker, C. (2010). The Glomeromycota is a species list with new families and new genera [Glomeromycota es una lista de especies con nuevas familias y nuevos géneros]. *Researchgate* 93(1). https://www.researchgate.net/publication/285775809_The_Glomeromycota
- Simpson, C. J., Reeves, G., Tripathi, A., Singh, P., y Hibberd, M. J. (2022). Using breeding and quantitative genetics to understand the C 4 pathway [Utilizando la genética cuantitativa y de reproducción para comprender la vía C 4]. *Journal of Experimental Botany*, 73(10), 3072–3084. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab486>
- Singmann, H., Bolker, B., Westfall, J., Aust, F., Ben, S., Aust, F., Ben Shachar M. S., Fox, J., Lawrence, M. A., y Bojesen Christensen, R. H., (2025). *Analysis of factorial experiments* (R package afex version 1.5-0) [Análisis de experimentos factoriales (paquete R afex versión 1.5-0)]. CRAN: Contributed Packages. <https://doi.org/10.32614/CRAN.PACKAGE.AFEX>
- Sobalvarro Bravo, Y. F., y Díaz Carballo, E. R. (2016). *Eficiencia de la fertilización especial y tradicional en el cultivo de maíz (Zea mays L.) variedad nutrinta amarillo, centro de experimentación y validación de tecnología las Mercedes 2015* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria, Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/3340/1/tnf04s677.pdf>
- Solís Espinoza, A. J. (2017). *Análisis económico del cultivo del frijol (Phaseolus vulgaris L.) en Nicaragua, 1980–2014* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/3622/1/tne10s687.pdf>
- Suárez, J. C., Anzola, J. A., Vanegas, J. I., Contreras, A. T., y Rao, I. M. (2025). Evaluating the influence of phosphorus supply on photosynthetic and agronomic performance of two breeding lines of common bean grown under acidic soil and high temperature stress [Evaluación de la influencia del aporte de fósforo en el rendimiento fotosintético y agronómico de dos líneas de frijol común cultivadas en suelo ácido y bajo estrés térmico]. *Plos One* 20(5). <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0324863>

- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., y Murphy, A. (2022). *Plant physiology and development* (7th ed.). [Fisiología y desarrollo vegetal (7ª ed)]. Oxford University Press. https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download_image/H8aTDrHeKuTogISO7SE1r80gjP2dmU.pdf
- Talavera Ortiz, A., Chaverri, P., Díaz Godínez, G., Acosta Urdapilleta, L., Villegas, E., y Téllez Téllez, M. (2020). Inhibición micelial de *Trichoderma spp.* (*Hypocreaceae*) aislado del cultivo de *Pleurotus ostreatus* (*Pleurotaceae*) con un extracto de *Pycnoporus sp.* (*Polyporaceae*). *Acta Botánica mexicana* 127(1537). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7232198.pdf>
- Torres, N. (2023). Precipitaciones y precios de granos básicos en Nicaragua. *Foro de Investigadores de Bancos Centrales del Consejo Monetario Centroamericano* 17. <https://www.secmca.org/recard/index.php/foro/article/view/221>
- Urbina Polanco, F. E., y Gudiel, H. E. (2022). *Evaluación de genotipos de frijol rojo (Phaseolus vulgaris L.) provenientes de una población criolla tolerantes a alta temperatura periodo 2019-2021* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua]. Repositorio Institucional. <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnf30u73eg.pdf>
- Valenzuela, R., Romero, L., Jiménez, J., Agudelo, R., Leyva, E., y Raymundo, T. (2017). Nuevos registros de *Hypocreales* (*Sordariomycetes*, *Ascomycota*) del bosque mesófilo de montaña de la Sierra Alta Hidalguense en México. *Acta Botánica Mexicana*, 120. <https://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n120/2448-7589-abm-120-00039.pdf>
- Villanueva, N. S. (2021). Mecanismos de inducción de rizobios para reducir el estrés por sequía en las leguminosas. *Revista de Investigaciones Altoandinas* 23(4). <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v23n4/2313-2957-ria-23-04-258.pdf>
- Villatoro Mérida, J. C, Franco Rivera, J. A., y Castillo Monterroso, F. C. (2022). *Manual para producción de frijol*. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Frijol/Manual%20de%20producci%C3%B3n%20de%20frijol%20ICTA.pdf>
- Villatoro Mérida, J., Franco Rivera, J., Ortiz, R. A., Castillo Monterroso, F., y Samayoa, K. P. (2016). *Rhizobium, inoculante para semilla de frijol*. *Investigación para el desarrollo agrícola*. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Frijol/Rhizobium,%20inoculante%20para%20semilla%20de%20frijol,%202012.pdf>
- Vizueté Orozco, V. E. (2022). *Determinación del método de riego más eficiente y ajuste del (kc) mediante lisimetría en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) var. canarillo mejorado* [Tesis de ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio

Institucional. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/b0c16396-ead1-4008-9ea6-ab91cc3eb591/content>

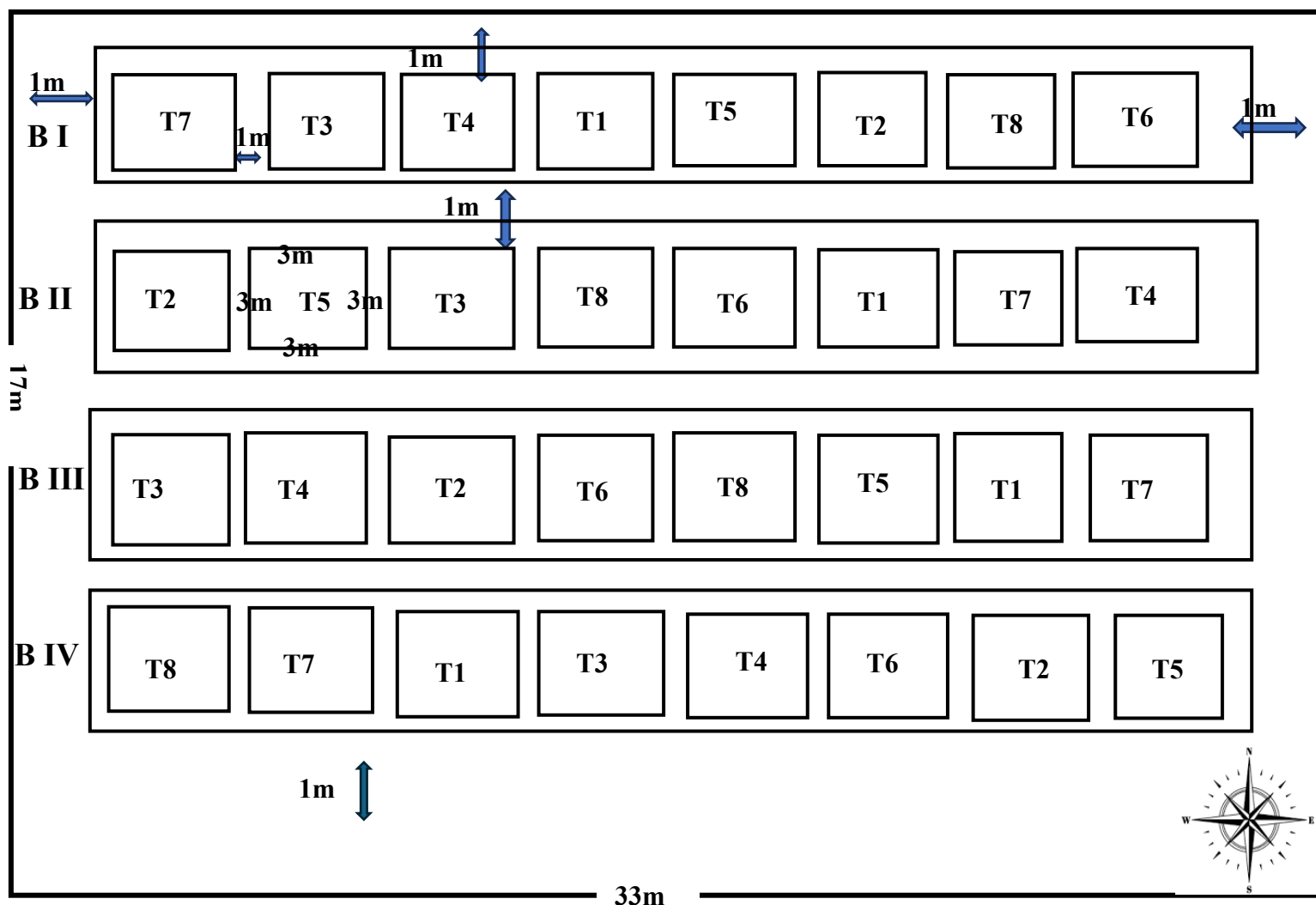
Wickham, H., Averick, J., Chang, W., McGowan, A., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., y Yutani, H. (2019). Welcome to Tidyverse [Bienvenido a Tidyverse]. *Journal of Open-Source Software*, 4(43), 1686. *Journal of Open-Source Software*, 4(43). <https://doi.org/10.21105/JOSS.01686>

Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., y Vaughan, D. (2014). *Dplyr: grammar of data manipulation* (R package). [Dplyr: gramática de manipulación de datos (paquete R)]. CRAN: Contributed Packages. <https://doi.org/10.32614/CRAN.PACKAGE.DPLYR>

Wickham, H., y Bryan, J. (2025). *Read Excel Files* (R package readxl version 1.4.5). [Leer archivos de Excel (paquete R readxl versión 1.4.5)]. CRAN: Contributed Packages. <https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html>

IX. ANEXOS

Anexo 1. Plano de campo. El área experimental presentó una dimensión de 17×33 m (561 m²), con parcelas 3×3 m cada una (9 m²), El diseño correspondió un BCA con el objetivo de controlar la fuente de variación asociada a la gradiente de luminosidad generada por la presencia de árboles ubicados al este y al oeste del terreno. T1 Micorriza arbusculares, T2 *Rhizobium*, T3 *Trichoderma harzianum*, T4 Testigo, T5 Micorrizas+*T. Harzianum*, T6 *Rhizobium*+*T. harzianum*, T7 Micorrizas+*Rhizobium*, T8 Micorriza+*Rhizobium*+*T. harzianum*



Anexo 2. Preparación del terreno para establecimiento del cultivo de frijol.



Anexo 3. Delimitación de bloques y parcelas para establecimiento del cultivo de frijol



Anexo 4. Pesado e inoculación de la semilla de frijol para establecimiento en campo



Anexo 5. Toma de datos de las variables de crecimiento.



Anexo 6. Cosecha de las plantas cuando alcanzaron su madurez fisiológica.



Anexo 7. Toma de datos de las variables de rendimiento.



Anexo 8. Vista del experimento en crecimiento y desarrollo del cultivo.

