

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS

**“EFECTO DE LA INTERACCIÓN DE FIJACIÓN BIOLÓGICA DE
NITRÓGENO POR *Rhizobium* spp. Y TRES NIVELES DE
FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL RENDIMIENTO DE *Phaseolus
Vulgaris* NATIVO, CAJABAMBA, CAJAMARCA, 2023”**

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Presentado por el Bachiller:

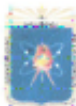
DANNY JARLIS VÁSQUEZ LOZANO

Asesor:

Ing. M. Sc. ATTILIO ISRAEL CADENILLAS MARTÍNEZ

CAJAMARCA – PERÚ

-2025-



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- **Investigador:** Danny Jarlis Vásquez lozano
DNI: 72475745
Escuela Profesional/Unidad UNC: Agronomía
- **Asesor:** Ing. M. Sc. Attilio Israel Cadenillas Martínez
- **Facultad/Unidad UNC:** Ciencias Agrarias
- **Grado académico o título profesional:**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
- **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
- **Título de Trabajo de Investigación:** "EFECTO DE LA INTERACCIÓN DE FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO POR *Rhizobium* spp. Y TRES NIVELES DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL RENDIMIENTO DE *Phaseolus vulgaris* NATIVO, CAJABAMBA, CAJAMARCA, 2023"
- **Fecha de evaluación:** 26/09/2025
- **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
- **Porcentaje de Informe de Similitud:** 17%
- **Código Documento:** oid: 3117:503880731
- **Resultado de la Evaluación de Similitud:** 17%
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 26/09/2025

Firma y/o Sello Emissor Constancia
 Ing. M. Sc Attilio Israel Cadenillas Martínez DNI: 266139254



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los diez días del mes de setiembre del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente 2C - 202 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según Resolución de Consejo de Facultad N° 107-2025-FCA-UNC, de fecha 07 de febrero del 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: "EFECTO DE LA INTERACCIÓN DE FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO POR *Rhizobium* spp. Y TRES NIVELES DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL RENDIMIENTO DE *Phaseolus vulgaris* NATIVO, CAJABAMBA, CAJAMARCA, 2023", realizada por el Bachiller DANNY JARLIS VÁSQUEZ LOZANO para optar el Título Profesional de INGENIERO AGRÓNOMO.

A las once horas y siete minutos, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de INGENIERO AGRÓNOMO.

A las doce horas y veintiún minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
PRESIDENTE

Dr. Wilfredo Poma Rojas
SECRETARIO

Ing. M. Sc. Jesús Hipólito De La Cruz Rojas
VOCAL

Ing. M. Sc. Attilio Israel Cadenillas Martínez
ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres, Gerardo Vásquez Malpica y Marilú Lozano Vásquez por su amor incondicional y apoyo constante y sacrificios incalculables. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia.
Este trabajo es un reflejo del amor y la confianza que siempre han depositado en mí.

Danny Jarlis Vásquez Lozano

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Cajamarca y a la Facultad de Ciencias Agrarias por brindarme las herramientas académicas y la formación necesaria para realizar esta investigación.

Al proyecto Suelos y Aguas del Instituto Nacional de Innovación Agraria por brindarme la oportunidad, la logística, el recurso necesario para el desarrollo de la investigación.

A Attilio Israel Cadenillas Martínez M.Sc (asesor), sea para el mi más sincero reconocimiento por su guía, paciencia y valiosas contribuciones a lo largo del desarrollo de esta investigación.

A mi familia, especialmente a mis padres, quienes han sido mi mayor fortaleza y motivación, les agradezco por creer en mis sueños y apoyarme incondicionalmente en cada paso de este camino.

A mis hermanas que son parte de mi vida, por crecer juntos y compartir bonitas experiencias las cuales estoy muy agradecido.

Finalmente, a todos los que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de este proyecto, les extiendo mi más sincero agradecimiento.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	3
1.2. Formulación del problema.....	4
1.3. Justificación.....	4
1.3.1. Justificación científica.....	5
1.3.2. Justificación técnico-práctica.....	5
1.3.3. Justificación institucional y personal.....	6
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivo Específico.....	6
1.5. Hipótesis.....	7
CAPÍTULO II.....	8
REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1. Antecedentes.....	8
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	8
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	12
2.1.3. Antecedentes locales.....	13
2.2. Marco teórico.....	14
2.2.1. Cultivo de frejol en el Perú.....	14
2.2.2. Importancia del cultivo.....	15

2.2.3.	Clasificación taxonómica	15
2.2.4.	Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN)	15
2.2.5.	Condiciones para la Fijación de Nitrógeno.	16
2.2.6.	Incorporación biológica de nitrógeno.....	16
2.2.7.	Asimilación del nitrógeno fijado.	17
2.2.8.	Fijación de nitrógeno en vida libre	17
2.2.9.	Importancia de los <i>Rhizobium ssp.</i> en la agricultura	18
2.2.10.	Inoculación de leguminosas.....	18
2.2.11.	Fertilización química y requerimientos nutricionales del frijol.....	19
2.3.	Definición de términos	20
2.3.1.	Leguminosas	20
2.3.2.	Simbiosis	20
2.3.3.	Nodulación	20
2.3.4.	Interacción	20
2.3.5.	Eficiencia	21
CAPÍTULO III		22
MATERIALES Y MÉTODOS.....		22
3.1.	Ubicación.....	22
3.2.	Materiales	23
3.2.1.	Equipos de protección personal.....	23
3.2.2.	Materiales de oficina	23
3.2.3.	Materiales y servicio de laboratorio (F-Q y B).....	23
3.2.4.	Material biológico	24
3.2.5.	Fertilizantes	24
3.2.6.	Manejo del Campo	25
3.3.	Metodología.....	25
3.3.1.	Definición de variables	25

3.3.2. Diseño experimental	25
3.3.3. Descripción del experimento	26
3.3.4. Conducción del experimento	27
3.3.5. Parámetros de evaluación	31
CAPÍTULO IV	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. Interacción de <i>Rhizobium phaseoli</i> -UNC1 y tres niveles de fertilización en rendimiento de <i>Phaseolus vulgaris</i>	34
4.2. Interacción de <i>Rhizobium phaseoli</i> -CIAT2 y tres niveles de fertilización en el rendimiento de <i>Phaseolus vulgaris</i>	36
4.3. Fijación biológica de sin inoculación de <i>Rhizobium</i> sp. y tres niveles de fertilización en el rendimiento <i>Phaseolus vulgaris</i>	38
4.4. Evaluación general de la interacción de fijación biológica de nitrógeno por <i>Rhizobium spp.</i> y tres niveles de fertilización química sobre el rendimiento de <i>Phaseolus vulgaris</i> nativo	39
4.5. Variables fenológicas y de crecimiento complementarias	40
CAPÍTULO V	59
CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO VI	59
RECOMENDACIONES	59
CAPÍTULO VII	60
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factores experimentales y niveles aplicados para evaluar la interacción de cepas de <i>Rhizobium</i> spp. y fertilización NPK en <i>Phaseolus vulgaris</i> nativo	26
Tabla 2 Distribución de tratamientos experimentales según cepa de <i>Rhizobium</i> spp., nivel de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O) y número de repeticiones en <i>Phaseolus vulgaris</i> nativo, Cajabamba – Cajamarca	26
Tabla 3 Análisis de suelo	27
Tabla 4 Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de <i>Rhizobium</i>) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)), en la variable rendimiento t ha ⁻¹	42
Tabla 5 Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable rendimiento t ha ⁻¹	44
Tabla 6 Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable rendimiento kg ha ⁻¹	44
Tabla 7 Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de <i>Rhizobium</i>) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)), en la variable número de nódulos	46
Tabla 8 Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable número de nódulos.	47
Tabla 9 Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable número de nódulos.	48
Tabla 10 Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de <i>Rhizobium</i>) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)), en la variable altura de planta.	49
Tabla 11 Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable altura de planta.	50
Tabla 12 Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable altura de planta.	51
Tabla 13 Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de <i>Rhizobium</i>) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)), en la variable días a la floración.	52
Tabla 14 Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable días a la floración.	54
Tabla 15 Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable días a la floración.	54
Tabla 16 Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de <i>Rhizobium</i>) y	

<i>Factor B (Niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O), en la variable días a la madurez de cosecha.</i>	<i>55</i>
Tabla 17 <i>Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable días a la madurez de cosecha.....</i>	<i>57</i>
Tabla 18 <i>Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable días a la madurez de cosecha.</i>	<i>57</i>
Tabla 19 <i>Test de supuestos de normalidad.....</i>	<i>65</i>
Tabla 20 <i>Test de supuestos de homogeneidad de varianza para altura de planta.....</i>	<i>65</i>
Tabla 21 <i>Test de supuestos de homogeneidad de varianza para rendimiento</i>	<i>65</i>
Tabla 22 <i>Test de supuestos de homogeneidad de varianza para días a la floración</i>	<i>65</i>
Tabla 23 <i>Test de supuestos de homogeneidad de varianza para rendimiento días a la madurez de cosecha.....</i>	<i>66</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del sistema experimental	22
Figura 2 Diseño experimental y distribución espacial del área de campo para la evaluación de <i>Rhizobium</i> spp. y niveles de fertilización en <i>Phaseolus vulgaris</i>	27
Figura 3 Interacción de medias marginales estimadas para la variable rendimiento t ha ⁻¹	43
Figura 4 Histograma de los resultados del rendimiento en kg ha ⁻¹ de los tratamientos en estudio.	45
Figura 5 Interacción de medias marginales estimadas para la variable número de nódulos.	46
Figura 6 Histograma de los resultados de la variable número de nódulos, con los tratamientos en estudio.	48
Figura 7 Interacción de medias marginales estimadas para la variable altura de planta (cm).	50
Figura 8 Histograma de los resultados de la variable altura de planta, con los tratamientos en estudio.	51
Figura 9 Interacción de medias marginales estimadas para la variable días a la floración.	53
Figura 10 Histograma de los resultados de días de floración, con los tratamientos en estudio.	55
Figura 11 Interacción de medias marginales estimadas para la variable días a la madurez de cosecha.	56
Figura 12 Histograma de los resultados de días de madurez de cosecha, con los tratamientos en estudio.	58
Figura 13 Análisis de suelo	67
Figura 14 Delimitación del área.	68
Figura 15 Recolección de la muestra de suelo	68
Figura 16 Encalado del área	69
Figura 17 Preparación del terreno	69
Figura 18 Delimitación de las unidades experimentales.	70
Figura 19 Área apropiada para la instalación del trabajo de investigación	70
Figura 20 Inoculación de semilla	71
Figura 21 Siembra de frijol nativo	71
Figura 22 Evaluación de emergencia	72

Figura 23 Primera fertilización	72
Figura 24 Riego por inundación.....	73
Figura 25 Tutorado de <i>Phaseolus vulgaris</i>	73
Figura 26 Control fitosanitario	74
Figura 27 Evaluación del botón floral	74
Figura 28 Evaluación de floración.....	75
Figura 29 Extracción de nódulos.....	75
Figura 30 Lavado de nódulos	76
Figura 31 Conteo de nódulos.....	76
Figura 32 Limpieza de malezas	77
Figura 33 Identificación de tratamientos	77
Figura 34 Evaluación de madurez fisiológica	78
Figura 35 Evaluación de madurez de cosecha	78
Figura 36 Cosecha	79
Figura 37 Pesado de grano	79
Figura 38 Muestras para ingresar al laboratorio	80
Figura 39 Foto representativa del trabajo de investigación	80

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la interacción entre la fijación biológica de nitrógeno por *Rhizobium spp.* y tres niveles de fertilización química con fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O) 0%, 50% y 100% de la dosis recomendada, sobre el rendimiento del frijol nativo (*Phaseolus vulgaris* “Tiachos bayo”) en la provincia de Cajabamba, Cajamarca. Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial 3×3 , conformado por nueve tratamientos resultantes de la combinación de dos cepas de *Rhizobium phaseoli* (UNC-1 y CIAT-2) y un testigo sin inoculación, junto con los tres niveles de fertilización, con tres repeticiones por tratamiento, totalizando 27 unidades experimentales. Los resultados mostraron que el tratamiento con la cepa CIAT-2 y fertilización al 100% alcanzó el mayor rendimiento de grano seco ($2\,172.33\text{ kg ha}^{-1}$) y el mayor número de nódulos activos (78.35). La inoculación promovió un crecimiento vegetativo más vigoroso, nodulación eficiente (nódulos de color rosado) y un ciclo fenológico más prolongado en comparación con los tratamientos sin inoculación o con menor fertilización. Se concluye que la inoculación con cepas eficientes de *Rhizobium*, combinada con una fertilización química adecuada, incrementa significativamente el rendimiento del frijol nativo, constituyendo una alternativa viable para reducir la dependencia de fertilizantes nitrogenados y fomentar prácticas agrícolas más sostenibles y productivas en la región andina.

Palabras claves: *Phaseolus vulgaris*, *Rhizobium*, fijación, rendimiento.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of the interaction between biological nitrogen fixation by *Rhizobium* spp. and three levels of chemical fertilization with phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) 0%, 50%, and 100% of the recommended dose on the yield of native bean (*Phaseolus vulgaris* “Tiachos bayo”) in the province of Cajabamba, Cajamarca. A randomized complete block design with a 3×3 factorial arrangement was used, consisting of nine treatments resulting from the combination of two strains of *Rhizobium phaseoli* (UNC-1 and CIAT-2) and an uninoculated control, together with the three fertilization levels, with three replications per treatment, totaling 27 experimental units. The results showed that the treatment with strain CIAT-2 and 100% fertilization achieved the highest dry grain yield ($2,172.33 \text{ kg ha}^{-1}$) and the greatest number of active nodules (78.35). Inoculation promoted more vigorous vegetative growth, efficient nodulation (pink-colored nodules), and a longer phenological cycle compared to uninoculated treatments or those with lower fertilization levels. It is concluded that inoculation with efficient strains of *Rhizobium*, combined with adequate chemical fertilization, significantly increases the yield of native bean, constituting a viable alternative to reduce dependence on nitrogen fertilizers and to foster more sustainable and productive agricultural practices in the Andean region.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*, *Rhizobium*, fixation, yield.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) es una de las especies de leguminosas de grano más importantes para el consumo humano, especialmente entre las poblaciones de las regiones menos desarrolladas (Ayala et al., 2021). En el Perú, el cultivo del frijol es uno de los más importantes y se extiende por las tres regiones principales: costa, sierra y selva. Se cultivan aproximadamente 74,000 hectáreas, produciendo alrededor de 88,000 toneladas de grano seco al año. Más del 90 % de esta producción se destina al consumo interno del país, mientras que cerca de 4,000 toneladas, correspondientes a variedades como canario, caballero, rojo arriñonado y panamito, se destinan para la exportación (Agraria, 2024).

Este cultivo es fundamental en la dieta diaria de las poblaciones de bajos recursos, ya que se produce y consume en grandes cantidades debido a sus notables cualidades. Agronómicamente, se destaca por su rápido crecimiento, alto potencial de rendimiento y capacidad para adaptarse a los valles cálidos de los Andes. Además, es útil en programas de rotación de cultivos y contribuye a mejorar la calidad del suelo al fijar nitrógeno mediante su simbiosis con *Rhizobium*; en cuanto a su valor nutricional, este cultivo aporta entre un 22 y 28% de proteínas, 59-60% de carbohidratos, además de ser rico en vitaminas, minerales y fibras solubles. Por estas características, constituye una de las principales fuentes de proteínas a nivel mundial, representando entre el 25 y 35% del consumo total de proteínas, superando incluso las proteínas de origen animal en muchas dietas, donde llega a cubrir más del 70% de los requerimientos proteicos (Cantaro et al., 2019).

El nitrógeno es fundamental para el crecimiento de todos los seres vivos, ya que forma parte de moléculas esenciales para la vida, influyendo en la calidad de las estructuras y los procesos biológicos; en las plantas, es uno de los elementos más importantes, y su disponibilidad determina en gran medida la productividad de los cultivos; una adecuada disponibilidad y absorción de nitrógeno no solo contribuye a obtener mayores rendimientos, sino también a mejorar la concentración de proteínas en forrajes y granos, lo cual incrementa su valor nutricional y calidad. (Fernández, 2020).

La simbiosis entre las leguminosas y las bacterias *Rhizobium* es un proceso biológico en el que el nitrógeno atmosférico (N_2) se convierte en amonio (NH_4^+), una forma que las plantas pueden absorber y utilizar. Este proceso ocurre en los nódulos que se forman en las raíces de las leguminosas, donde los rizobios fijan el nitrógeno. A nivel mundial, los

rizobios presentes en estos nódulos contribuyen con el 50-70% del nitrógeno biológicamente fijado y proporcionan hasta el 65% del nitrógeno utilizado en la agricultura, siendo una fuente esencial para la nutrición de los cultivos y la mejora de la fertilidad del suelo (López et al., 2020).

En suelos áridos y desérticos, los fertilizantes inorgánicos se utilizan con frecuencia para mejorar la fertilidad. Sin embargo, cuando se aplican en dosis elevadas, pueden tener efectos negativos e impredecibles en el medio ambiente, contaminando el suelo, el agua y los ecosistemas naturales. Por ello, la Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) es una alternativa más adecuada para incorporar nitrógeno de forma natural en estos ecosistemas, volviéndolos productivos y sostenibles. En estas áreas, es recomendable cultivar leguminosas nativas, ya que los rizobios con los que se asocian están adaptados a las condiciones ambientales y pueden establecer simbiosis incluso bajo situaciones de estrés (Bianco, 2020).

Una solución ecológica para mejorar la fertilidad del suelo es el uso de inoculantes que contienen bacterias fijadoras de nitrógeno e inductoras de nódulos, conocidas como rizobios. Estas bacterias, al formar una relación simbiótica con las leguminosas, son capaces de captar el nitrógeno del aire y transformarlo en nitrógeno orgánico, que la planta puede utilizar en sus procesos metabólicos. Así, el nitrógeno se incorpora en el suelo de forma natural, favoreciendo el crecimiento de las plantas y contribuyendo a la sostenibilidad del ecosistema (Cantaro et al., 2019).

El desgaste del suelo es uno de los principales problemas de la producción agrícola actual, provocado por su uso excesivo, la falta de rotación de cultivos y factores climáticos adversos. Ante esta situación, el uso de biofertilizantes se presenta como una alternativa viable. Los productores cuentan con herramientas naturales para optimizar el rendimiento de las cosechas y conservar la calidad del suelo. Un ejemplo de ello es la inoculación, una práctica relativamente nueva en el país, que se utiliza principalmente en leguminosas y que ha comenzado a extenderse a otros cultivos. Esta técnica aún tiene un gran potencial de desarrollo y puede contribuir significativamente a una agricultura más sostenible y productiva (Paredes, 2013).

Dada su relevancia económica y ecológica, es fundamental seguir investigando para identificar especies de leguminosas nativas con alta capacidad de nodulación y fijación biológica de nitrógeno. Esto permitiría desarrollar estrategias de manejo y conservación más efectivas, promoviendo la sostenibilidad de los suelos y evitando el avance de la

desertificación en las regiones áridas. Con estas medidas, se podría mejorar la fertilidad del suelo de forma natural, contribuyendo a la producción agrícola y a la protección del medio ambiente. (Bianco, 2020).

En el Perú se cultivan 12 especies de legumbres y más de 80 variedades comerciales en las tres regiones del país y en los 24 departamentos, desde el nivel del mar hasta más de 3,200 metros de altitud; entre estas, el frijol y el pallar son nativos del Perú y América. La diversidad de ciclos vegetativos y la capacidad de adaptación de algunas variedades permiten la producción continua de menestras durante todo el año, garantizando el abastecimiento del mercado nacional y la oportunidad de aprovechar algunas ventanas comerciales a nivel internacional (Ministerio de Agricultura, 2003).

Es pertinente, fortalecer el estudio de la simbiosis entre *Phaseolus vulgaris* y cepas eficientes de *Rhizobium* representa no solo una alternativa viable para reducir la dependencia de fertilizantes químicos, sino también una estrategia integral para mejorar la salud del suelo y promover una agricultura más sostenible. Desde una perspectiva local, aplicar este conocimiento en regiones como Cajamarca donde este cultivo es representativo y las condiciones agroecológicas pueden ser limitantes, permite aprovechar la biodiversidad nativa y los recursos biológicos disponibles. La validación de estas prácticas en campo ofrece oportunidades reales para pequeños productores, contribuyendo a la seguridad alimentaria y a la conservación de los ecosistemas agrícolas andinos. Esta investigación reafirma la importancia de integrar la biotecnología microbiana con prácticas tradicionales, como una vía eficiente y ecológica para mejorar el rendimiento y la resiliencia de cultivos fundamentales como el frijol.

1.1. Descripción del problema

La baja fertilidad y la escasez de suelos agrícolas son problemas críticos en el país, ya que solo el 7% del territorio nacional es apto para la agricultura. Además, estos suelos están gravemente amenazados por distintos procesos de deterioro: en la costa, la salinización; en la sierra, la erosión; y en la Amazonía, la pérdida de fertilidad. Actualmente, 8 millones de hectáreas se consideran severamente erosionadas y otros 31 millones moderadamente erosionadas. Se estima que alrededor del 40% de los suelos agrícolas de la costa presentan problemas de salinización y mal drenaje. En la sierra, al menos un 60% de los suelos agrícolas están afectados por erosión de moderada a extrema gravedad debido a la falta de técnicas de manejo y la pérdida de cobertura vegetal en las laderas. En la Amazonía, el 60% de los suelos de las tierras ocupadas, 5 millones de

hectáreas, están en abandono debido a la pérdida de fertilidad y la erosión causada por prácticas agrícolas inadecuadas (MIDAGRI, 2020).

Se busca mantener fértil el suelo ya que es uno de los pilares de la producción agrícola. Asimismo, el suelo debe entenderse como un sistema complejo con propiedades físicas, químicas y biológicas que son de vital importancia para el logro de un desarrollo óptimo de los cultivos. Mediante la aplicación de microorganismos se buscó cubrir el esperado déficit entre entradas y salidas de nutrientes en el suelo, con la finalidad de mantener o incrementar la fertilidad presente y futura del mismo, además el manejo biológico del suelo debe aportar los nutrientes que necesite el cultivo para mejorar su producción que será plasmada en su rendimiento (González y Pomares, 2008).

Esta problemática compromete gravemente el desarrollo agrícola del país, debido a la acelerada degradación de los suelos y a la urgente necesidad de implementar sistemas productivos sostenibles. Esta situación es especialmente crítica en regiones altoandinas como Cajamarca, donde las limitaciones edáficas restringen el rendimiento de los cultivos y amenazan la seguridad alimentaria local. En este contexto, adoptar estrategias que mejoren la fertilidad del suelo de forma sostenible. Una de ellas es el uso de microorganismos fijadores de nitrógeno, como las cepas de *Rhizobium spp.*, que en simbiosis con leguminosas como el frijol (*Phaseolus vulgaris*), pueden incorporar nitrógeno atmosférico al suelo sin necesidad de fertilizantes químicos. Esta alternativa biológica busca no solo optimizar el rendimiento del cultivo, sino también reducir el impacto ambiental y garantizar un manejo más eficiente y sostenible de los recursos naturales en la agricultura.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la interacción de fijación biológica de nitrógeno por *Rhizobium spp* y tres niveles de fertilización química sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo, Cajabamba, Cajamarca, 2023?

1.3. Justificación

El nitrógeno después del agua es un elemento esencial para las plantas, por lo cual la fijación de nitrógeno en el suelo es eficiente de manera que necesitamos reducir los insumos de fertilizantes nitrogenados, con una baja huella de carbono lo que disminuye la contaminación ambiental y enriquece el suelo para los siguientes cultivos a instalar.

Por ende, mediante este trabajo de investigación a realizarse, tendremos la posibilidad de

seleccionar el mejor tratamiento con mejor respuesta del cultivo mediante la interacción entre fertilización biológica y química que nos permitirá conocer si nos aporta nitrógeno al suelo para el siguiente cultivo, pero como pilar de esta investigación la tendencia es generar un mejor rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo, ya que es una de las leguminosas de alto consumo humano en nuestra región.

1.3.1. Justificación científica

Esta investigación se justifica teóricamente, en la generación de conocimientos científicos rescatando la aplicación de investigaciones validadas en nuevo ambiente en condiciones climáticas diferentes y bajo el rigor científico necesario para la obtención de datos validados que contribuyan de manera oportuna en la mejora de la calidad de vida de los productores; y de esta manera asegurar la producción alimentaria en el contexto de los objetivos del desarrollo sostenible. Además, esta investigación servirá como insumo principal para el desarrollo de nuevas investigaciones, que enriquezcan el quehacer científico de los profesionales enmarcados en las ciencias agronómicas.

1.3.2. Justificación técnico-práctica

Esta investigación se justifica por su aporte en la combinación de conocimientos científicos y técnicos para abordar un problema crítico de la agricultura en la región de Cajamarca y del país en general, mediante condiciones de aplicabilidad metodológica objetivas y sistemáticas, que garantizan el desarrollo del trabajo para verificación a otras condiciones altitudinales, uso de otro tipo de microorganismos, condiciones climáticas y más; que podrían generar variación en los resultados. Asimismo, se justifica por el proceso ordenado y coherente en las etapas del desarrollo productivo y de investigación que conducen a generar soluciones oportunas bajo las necesidades de la población.

Dentro del aspecto práctico, los resultados que se obtuvo son de gran ayuda como una alternativa técnicamente viable, económicamente sostenible y ambientalmente amigable; debido a que, se orienta a mejorar el déficit de nutrientes en el suelo y por ende la fertilización biológica; que se oriente a un mejor rendimiento de los cultivos. La validación de esta tecnología bajo condiciones locales, así como su potencial para ser transferida a los productores, garantiza que los resultados tendrán un impacto tangible en la producción agrícola y en la conservación de suelos, promoviendo un desarrollo agrario sostenible y eficiente.

1.3.3. Justificación institucional y personal

La investigación se justifica por el fortalecimiento interinstitucional que radica en el cumplimiento de la misión y visión de la Universidad Nacional de Cajamarca y del Instituto Nacional de Innovación Agraria. Las ciencias agronómicas, son concebidas como la base piramidal para el sustento de la vida, es por ello que, en el desarrollo de la investigación, se buscó gestionar de manera eficiente y objetiva temáticas actuales, de interés y con miras a la productividad amigable y respetuosa con el ambiente; promoviendo la innovación, la investigación aplicada y la transferencia de tecnologías hacia el sector agropecuario. La implementación de este tipo de trabajos de investigación fomenta la colaboración con otros actores del sector agrícola, como agricultores, empresas y asociaciones, consolidando el rol de estas instituciones como líderes en la investigación y desarrollo agrario en el país. También se resalta la necesidad de desarrollar investigaciones que contribuyan a la sostenibilidad, conservación y desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y el uso de tecnologías avanzadas para la recuperación y mejora de los suelos, siendo esencial para la agricultura. Bajo este sustento alineamos los objetivos personales como un aporte importante para soslayar el ejercicio profesional con oportunidades que permitan observar el mundo laboral y el de la investigación en un solo proceso, que garantice el éxito y el despertar científico.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el efecto de la interacción de fijación biológica de nitrógeno por *Rhizobium spp.* y tres niveles de fertilización química sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo, Cajabamba, Cajamarca, 2023.

1.4.2. Objetivo Específico

- Determinar la eficiencia de la interacción de fijación biológica del nitrógeno por *Rhizobium phaseoli-UNC1* y tres niveles de fertilización química en el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo.
- Determinar la eficiencia de la interacción de fijación biológica del nitrógeno por *Rhizobium phaseoli-CIAT2* y tres niveles de fertilización química en el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo.

- Determinar la fijación biológica de nitrógeno sin inoculación de *Rhizobium SPP.* bajo tres niveles de fertilización química, sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo.

1.5. Hipótesis

Al menos uno de los tratamientos a evaluar el efecto de la interacción de fijación biológica de nitrógeno por *Rhizobium spp.* y tres niveles de fertilización química mejora el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo, Cajabamba, Cajamarca, 2023.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Calero et al. (2019) evaluaron el impacto de la aplicación conjunta de *Rhizobium leguminosarum* y microorganismos eficientes en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*). El estudio se centró en analizar cómo diferentes métodos de inoculación afectan las características morfológicas y productivas de este cultivo. Los resultados fueron sobresalientes cuando las semillas se inocularon con *Rhizobium*, mostrando un aumento del 92,12 % en la producción de hojas, 72,29 % en la altura de las plantas, 81,19 % en el número de vainas por planta, 111,27 % en el número de granos por vaina, 42,88 % en la masa de 100 granos, y un notable incremento del 153,23 % en el rendimiento total del grano, en comparación con el tratamiento control. Por otro lado, aunque los tratamientos sin inoculación directa con *Rhizobium* mostraron menores incrementos en los parámetros productivos, los resultados aún fueron considerables. Se registraron aumentos del 65,85 % en la producción de hojas, 36,50 % en la altura de las plantas, 37,07 % en el número de vainas por planta, 44,84 % en el número de granos por vaina, 16,41 % en la masa de 100 granos y un 100 % de incremento en el rendimiento del grano respecto al control. Este estudio resalta la efectividad de la inoculación con *Rhizobium* para optimizar el desarrollo morfológico y aumentar significativamente la productividad del frijol común.

Cantaro et al. (2019) evaluaron la efectividad simbiótica de dos cepas de *Rhizobium* (LMT10 y LMT15) en cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en Perú. El estudio comparó estas cepas con una cepa nativa y un tratamiento de fertilización nitrogenada de 100 kg, con el objetivo de analizar el impacto en el rendimiento y la formación de nódulos en las raíces. Las variedades estudiadas fueron Canario Centenario, Canario CIFAC, Blanco Molinero y Rojo Molinero. Los resultados indicaron que las variedades Blanco Molinero y Canario Centenario obtuvieron los mayores rendimientos, con 2.636 kg y 2.523 kg, respectivamente. Se observó una interacción significativa entre la fuente de nitrógeno y la variedad en el número de vainas por planta. Además, las variedades inoculadas con *Rhizobium* presentaron un mayor número de nódulos y mayores rendimientos en comparación con las no

inoculadas o tratadas con fertilización nitrogenada convencional. Si bien en algunas variedades, como Rojo Molinero, no se detectaron diferencias significativas, probablemente debido a condiciones ambientales adversas, el estudio sugiere que la inoculación con *Rhizobium* es una estrategia eficaz para aumentar la productividad del frijol. Estos hallazgos destacan su potencial aplicación a gran escala en la agricultura comercial del país.

Fonseca et al. (2019) llevaron a cabo una investigación centrada en las técnicas utilizadas en el ámbito agrícola para cuantificar la fijación de nitrógeno, proporcionando una visión crítica sobre los métodos indirectos comúnmente empleados. Según los autores, técnicas como el conteo de nódulos y la medición de la masa nodular, que se usan frecuentemente para estimar la fijación de nitrógeno, no son del todo confiables. Estas técnicas tienden a sobrestimar o subestimar la cantidad de nitrógeno fijado debido a su baja precisión en la detección. A pesar de esto, reconocen que existe una correlación entre la masa nodular y el contenido de nitrógeno fijado, aunque esta relación no es suficiente para obtener mediciones exactas. Resaltan que el método de dilución isotópica es, actualmente, la técnica más sensible y precisa para cuantificar la fijación de nitrógeno, ya que permite detectar tasas muy bajas de nitrógeno que los métodos de masa nodular no pueden identificar. Sin embargo, señalan que este proceso no está exento de dificultades, ya que es complicado controlar todos los factores externos que influyen en el ciclo del nitrógeno, un proceso que, al igual que otros procesos biogeoquímicos, puede ser intermitente. La acción de los microorganismos fijadores de nitrógeno depende de condiciones ambientales favorables, como la disponibilidad de humedad y elementos minerales esenciales, lo que hace que la fijación de nitrógeno sea variable y dependiente del entorno.

Hernández et al. (2019) evaluaron el efecto del inoculante Azofert, basado en *Rhizobium*, en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Delicias 364 en Manatí, Las Tunas. Se enfocaron en la altura de la planta, longitud de la raíz, peso fresco y seco, y la nodulación de las raíces. Los resultados mostraron que las variables de altura y longitud de raíz no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, el peso fresco y seco de la planta y la raíz fue mayor en los tratamientos con *Rhizobium* más fósforo y potasio, indicando la influencia positiva del inoculante. Además, la simbiosis *Rhizobium*-frijol incrementó la nodulación y la fijación biológica de nitrógeno (FBN), mejorando el crecimiento y

el rendimiento de las plantas. Los tratamientos con *Rhizobium* y pequeñas dosis de nitrógeno o fósforo alcanzaron mayores rendimientos y peso seco de los nódulos, mostrando la importancia del fósforo para una nodulación eficiente. A nivel productivo, se observaron mayores rendimientos en granos por planta y peso de semillas en los tratamientos inoculados. La investigación concluye que la inoculación con *Rhizobium* y fósforo mejora la fijación de nitrógeno y el rendimiento del frijol, sin diferencias significativas respecto a la fertilización mineral convencional.

En su investigación, López et al. (2020) evaluaron la eficiencia en la fijación biológica de nitrógeno (FBN) de 27 cepas de *Rhizobium spp.* recolectadas de frijol cultivado y silvestre en el occidente de México, utilizando la variedad Cuarenteño como hospedero. El experimento se llevó a cabo bajo malla sombra, empleando un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones. Los resultados revelaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en seis de las ocho variables evaluadas, con la excepción de la longitud de raíz y el contenido de clorofila. En longitud de vástago, la cepa *Rhizojal SA3* alcanzó 37.2 cm, superando al testigo absoluto (28.1 cm) y siendo similar al testigo fertilizado (32.1 cm). Otras cinco cepas mostraron alturas superiores a 35 cm. En cuanto al peso seco de vástago, *Rhizojal ZCB3* y *Rhizojal TP3* (1.25 g) también superaron al testigo absoluto (0.97 g). Seis cepas, entre ellas *Rhizojal CV3* y *Rhizojal ZCB3*, mostraron más de 340 nódulos por planta. En nitrógeno total del vástago, 25 cepas superaron al testigo absoluto (3.49%), indicando un alto potencial de estas cepas para mejorar la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de frijol.

Ayvar et al. (2020) investigaron la rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje en híbridos de maíz bajo condiciones de trópico seco, comparando la fertilización biológica y química. El estudio evaluó tres híbridos de maíz: P4082W, H565 y DK357, bajo dos tratamientos: fertilización exclusivamente química (120N-80P-80K) y una combinación de fertilización química y biológica. En los tratamientos con biofertilizantes, las semillas fueron inoculadas con *Glomus intraradices* y *Azospirillum brasilense*. Las variables analizadas incluyeron altura de planta, diámetro del tallo, número de hojas, características de las mazorcas (peso, número, tamaño), y rendimiento total de grano. Los resultados mostraron que la fertilización combinada promovió un mayor crecimiento, con plantas alcanzando hasta 3.2 metros en comparación con 2.88 metros bajo fertilización exclusivamente

química. El híbrido DK357 demostró el mayor potencial de crecimiento y rendimiento. El incremento en el desarrollo de las plantas se atribuyó a los efectos de las micorrizas, que mejoran el sistema radicular y la absorción de nutrientes y agua, y a *Azospirillum brasilense*, que optimiza el uso del nitrógeno. Este estudio demuestra que la combinación de fertilización química y biológica mejora significativamente el crecimiento y rendimiento del maíz en trópico seco, superando los resultados obtenidos con fertilización química sola.

Díaz (2022) realizó un trabajo de investigación, denominado beneficios ambientales y económicos de *Rhizobium spp.* en relación simbiótica con especies vegetales en base a su capacidad de fijación de nitrógeno, con el objetivo de evaluar los beneficios ambientales y socioeconómicos de la implementación de *Rhizobium spp.* en sistema silvopastoriles, agroforestales y cultivos de consumo humano por medio de una revisión bibliográfica obtenidos en base a la implementación de *Rhizobium spp.* como alternativa en las actividades agrícolas van desde lo ambiental hasta lo económico, permitiendo recuperar suelos, aguas, lagos, incluso mayor producción sin tantos costos, combatiendo grandes problemas ambientales como la sequía y deforestación, que aumentaban el uso irracional de sustancias químicas que prometían recuperar los suelos que por derrames químicos, incendios, pocos nutrientes, y demás factores que no podían ser utilizados para cultivar, sin embargo, esto provoca una mayor infertilidad, por eso de acuerdo a esta revisión bibliográfica y a los estudios realizados durante estos últimos 5 años, se ha colocado al frente la implementación de estas bacterias de vida libre, que de una u otra manera reviven ciertos suelos que no se imaginaban volver a usar.

Lepiz et al. (2024) investigaron la eficiencia en la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en genotipos de frijol cultivado y silvestre. Evaluaron cinco cultivares de hábito arbustivo, cinco de hábito enredador y diez poblaciones silvestres, inoculadas con tres cepas de Rizobio. Utilizaron un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones, registrando ocho variables cuantitativas relacionadas con el crecimiento y nodulación. Los análisis de varianza revelaron diferencias significativas en todas las variables. Los coeficientes de variación fueron altos, especialmente en número y peso seco de nódulos, debido a la dificultad para contabilizar los nódulos pequeños. La longitud del vástago (LV) y el peso seco del vástago (PSV) mostraron correlación moderada ($r = 0.558$), siendo los genotipos de hábito enredador superiores en LV, aunque en PSV no hubo

diferencias significativas entre la mayoría de los genotipos.

El número de nódulos (NN) fue mayor en los genotipos silvestres, superando los 400 nódulos, mientras que el peso seco de nódulos (PSN) fue mayor en los arbustivos. Además, el nitrógeno total (NT) fue más alto en los cultivares arbustivos, y aunque el contenido de clorofila (CL) mostró poca variación, los genotipos arbustivos destacaron en promedio. Los resultados sugieren que los frijoles arbustivos cultivados son más eficientes en FBN que los enredadores y silvestres.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Cuadros (2016) evaluó el rendimiento de cinco cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. (Ñuña) mediante la fijación biológica de nitrógeno en simbiosis con *Rhizobium phaseoli*. El objetivo fue comparar el impacto de la inoculación con cepas eficientes de *Rhizobium phaseoli* (Rhizocaj) frente a plantas no inoculadas ni fertilizadas. En las plantas sin inoculación ni fertilización, se observó clorosis y coloración verde pálido, síntomas de deficiencia de nitrógeno. Sin embargo, tanto las plantas inoculadas con *Rhizobium* como las fertilizadas con urea presentaron un color verde intenso, lo que indicó que ambas recibieron nitrógeno suficiente: en las inoculadas, a través de la fijación simbiótica, y en las fertilizadas, por absorción de nitratos. El estudio mostró que los nódulos bacterianos comenzaron a formarse entre los días 75 y 80 tras la siembra, afectando al 50 % de la población de los cultivares. No se encontraron diferencias significativas en la disposición experimental de los tratamientos y cultivares, lo que sugiere que la ubicación no influyó en los resultados. Este experimento demostró que la inoculación con *Rhizobium phaseoli* puede ser efectiva como la fertilización con urea, lo que resalta su potencial para reducir la dependencia de fertilizantes químicos y promover una producción sostenible de *Phaseolus vulgaris*.

Medina y Prada (2021) realizaron una investigación cuyo objetivo fue identificar los tipos de leguminosas más eficientes en la fijación biológica de nitrógeno y su capacidad para mejorar las condiciones edafológicas en suelos agrícolas. A través de una revisión sistemática, se identificaron cinco especies principales: Kudzú (*Pueraria phaseoloides*), Junquillo (*Desmodium ovalifolium*), Maní (*Arachis pintoi*), Tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) y Caupí (*Vigna unguiculata*). Los resultados indicaron que estas leguminosas presentan una alta tolerancia a suelos de baja fertilidad y condiciones de estrés hídrico, lo que las hace especialmente

adecuadas para zonas tropicales y subtropicales. El estudio también reveló que las tasas de fijación de nitrógeno varían entre las especies, con *Arachis pintoii* fijando hasta 130.38 kg N y *Lupinus mutabilis* Sweet alcanzando los 400 kg N. Además, el porcentaje de nitrógeno derivado de la atmósfera osciló entre el 50% en *Pueraria phaseoloides* y el 100% en *Vigna unguiculata*, mostrando la eficiencia de estas plantas en la captación de nitrógeno atmosférico. A pesar de la evidencia de la efectividad de las leguminosas para mejorar la fertilidad del suelo, concluyeron que aún se recurre con frecuencia a fertilizantes químicos y orgánicos en la agricultura, lo que subraya la necesidad de una mayor implementación de prácticas agrícolas sostenibles que aprovechen el potencial de las leguminosas para mejorar los rendimientos de los cultivos y reducir el uso de insumos sintéticos.

Rodríguez y Ruiz (2022) llevaron a cabo un estudio centrado en evaluar el efecto de la inoculación de cepas de *Rhizobium* eficientes en la fijación biológica de nitrógeno sobre los parámetros de rendimiento del *Phaseolus vulgaris* "frijol común" variedad Panamito, bajo condiciones de campo en el sector Aucasoma. Para ello, se utilizaron las siguientes cepas de *Rhizobium*: *Rhizobium tropici* CIAT 899, *Rhizobium* sp. COLOMBIA, *Rhizobium freirei* PRF81, *Rhizobium* sp. E10, y otras cepas no identificadas como *Rhizobium* sp.. Los resultados obtenidos mostraron que el tratamiento con la cepa *Rhizobium* sp. E10 alcanzó el mayor rendimiento, con un promedio de 1 257,5 kg ha⁻¹, seguido por los tratamientos con CIAT 899, COLOMBIA, PRF81 y el tratamiento nitrogenado, con rendimientos de 1 225,68 kg ha⁻¹, 1 127,58 kg ha⁻¹, 1 115,83 kg ha⁻¹ y 1 104,83 kg ha⁻¹, respectivamente. Además, todos los tratamientos inoculados con las cepas de *Rhizobium* y el tratamiento nitrogenado superaron significativamente al testigo (sin inoculación), que obtuvo un rendimiento promedio de 822,31 kg ha⁻¹. En términos porcentuales, las cepas inoculadas y el tratamiento nitrogenado mostraron incrementos en el rendimiento del frijol en condiciones de campo, alcanzando mejoras del 152,92 %, 149 %, 137,12 %, 135,69 % y 134,35 % en comparación con el testigo, lo que resalta la efectividad de la inoculación con *Rhizobium* y el control nitrogenado en el aumento de la productividad del cultivo de frijol común.

2.1.3. Antecedentes locales

Rodríguez y Ruiz (2022) realizaron un estudio titulado *Seguimiento al uso de Rhizobium phaseoli en las siembras comerciales del frijol Phaseolus vulgaris L. en Cajamarca, Perú*, con el objetivo de mejorar la productividad del frijol a través de

la inoculación con *Rhizobium phaseoli* para suplir la deficiencia de nitrógeno. En el primer año, se comparó el rendimiento del frijol inoculado con el promedio de la zona, logrando un aumento de más de 700 kg ha⁻¹. En el segundo año, se evaluaron variedades específicas, obteniendo incrementos de 160 kg ha⁻¹ en los frijoles "Pintados" y 290 kg ha⁻¹ en los "Tiachos bayo", lo que representó aumentos del 200% y 270%, respectivamente. Pese a las lluvias excesivas, los agricultores lograron ganancias de entre US\$ 65.00 y US\$ 177.50 por hectárea con el uso del inoculante. Además, el maíz mostró un incremento de 572 kg ha⁻¹, representando un aumento del 144% y una ganancia neta de US\$ 414.50 por hectárea. El uso de *Rhizobium phaseoli* resultó ser 10 veces más económico que la fertilización nitrogenada convencional, con un costo de US\$ 2.00 por hectárea frente a US\$ 20.00. El 92.5% de los agricultores reportaron buenos resultados y el 98% manifestó su intención de usar el inoculante en la siguiente campaña, destacando su rentabilidad y eficacia.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Cultivo de frejol en el Perú

Las leguminosas peruanas, especialmente el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), son un alimento fundamental en la dieta debido a su alto contenido de carbohidratos y proteínas. Además de ser una fuente importante de energía, estas leguminosas aportan aminoácidos esenciales, lo que las convierte en un complemento nutricional valioso para poblaciones con acceso limitado a fuentes de proteínas de origen animal. Su versatilidad en la cocina y su capacidad para adaptarse a diversas condiciones de cultivo contribuyen a su papel como un pilar en la alimentación y seguridad alimentaria en Perú y otras regiones de América Latina (Rodríguez y Ruiz, 2022).

En el año 2020, la producción de frijol grano seco alcanzó las 90,180 toneladas, representando el 33.40% del total de la producción de leguminosas en el país. Las principales regiones productoras fueron Cajamarca, con 15,004 toneladas cosechadas en 17,628 hectáreas; Apurímac, con 8,363 toneladas en 3,804 hectáreas; Arequipa, con 7,180 toneladas en 7,239 hectáreas; y Amazonas, con 6,949 toneladas en 8,123 hectáreas. Estas regiones se destacan por su capacidad productiva y contribuyen de manera significativa a la oferta de frijol en el mercado nacional (Cayetano et al., 2022).

2.2.2. Importancia del cultivo

El frijol, perteneciente a la familia de las leguminosas, es una de las principales fuentes de alimento en la dieta humana y destaca por su amplia diversidad genética en la sierra peruana. La región serrana, que abarca desde los 600 hasta los 3,200 metros sobre el nivel del mar, presenta una gran variedad de frijoles cultivados por los agricultores. En la sierra norte (Ancash, La Libertad, Cajamarca), se cultiva hasta los 2,800 msnm, mientras que en la sierra sur (Ayacucho, Apurímac, Cusco), el cultivo alcanza hasta los 3,200 msnm. En Cusco, el frijol arbustivo crece hasta los 3,100 msnm y el poroto entre los 2,700 y 2,900 msnm (Sorel, 2014).

En ciertas regiones, los frijoles arbustivos son conocidos como Tiachos bayo, término que proviene del quechua "tiac", que significa “sentado”. En otros casos, se les denomina "ashpa poroto", del quechua "ashpa", que significa “arbustivo”. Estos nombres reflejan la adaptación del frijol a las particularidades del entorno andino y su reconocimiento cultural como un cultivo importante (Sorel, 2014).

2.2.3. Clasificación taxonómica

Rodríguez y Ruiz (2022) clasifica al frijol de la siguiente manera:

Reino: Plantae

División: Tracheophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Género: *Phaseolus*.

Especie: *Phaseolus vulgaris*.

2.2.4. Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN)

La Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) es un proceso en el que ciertos microorganismos, como bacterias y cianobacterias, convierten el nitrógeno del aire en amoníaco mediante la acción de la enzima nitrogenasa, facilitando así la producción de proteínas. Estos microorganismos pueden vivir de manera independiente en el suelo, asociados eventualmente a plantas, o en simbiosis con ellas. El nitrógeno atmosférico (N_2) representa el 80% del aire, pero las plantas solo lo absorben en forma de nitratos (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Para que las plantas puedan utilizarlo, las bacterias transforman el nitrógeno no asimilable (N_2)

en formas disponibles (Paredes, 2013).

La fijación biológica de nitrógeno es un proceso que aumenta las reservas de nitrógeno en el suelo y es llevado a cabo por organismos procariotas. Se presenta en tres formas principales: libre (por *Klebsiella sp.* y *Clostridium sp.*), no simbiótica (por *Azospirillum sp.* y *Azotobacter sp.*) y simbiótica (por *Rhizobium spp.*). De estas, la fijación simbiótica es la más relevante en agricultura, ya que contribuye significativamente a la nutrición de las plantas, especialmente en las leguminosas. Por esta razón, se han realizado numerosos estudios para comprender los mecanismos fundamentales de este proceso (Laguna, 2019).

2.2.5. Condiciones para la Fijación de Nitrógeno.

Existen condiciones necesarias para que el proceso de fijación de nitrógeno se dé correctamente, por tal razón, es importante que exista un ambiente anaerobio, debido a que la presencia de oxígeno es un factor que inactiva la nitrogenasa, enzima la cual actúa en la fijación de nitrógeno, y para que se de este proceso, es necesario que haya un ambiente con poco oxígeno, pues como se ha mencionado anteriormente las bacterias simbióticas pueden ser anaerobias facultativas o estrictas como es el caso del género (Diaz, 2022).

2.2.6. Incorporación biológica de nitrógeno.

En la naturaleza, existen organismos procariotas (bacterias, actinomicetes y cianobacterias) que, bajo condiciones de presión y temperatura ambiental, pueden romper el enlace triple del N_2 . Para lograrlo, utilizan una enzima llamada nitrogenasa y requieren energía metabólica (ATP). Este proceso, conocido como fijación biológica de nitrógeno, permite la conversión de N_2 en una forma asimilable para las plantas. La ecuación simplificada de este proceso, que describe cómo el nitrógeno se incorpora en compuestos útiles, se presenta a continuación (Fernández, 2020).

Según Baca et al., (2000):



Esta ecuación representa la conversión del nitrógeno molecular (N_2) en amoníaco (NH_3), un proceso esencial para la incorporación del nitrógeno en formas asimilables por las plantas. La reacción es catalizada por la nitrogenasa y requiere una considerable cantidad de energía, suministrada por la hidrólisis de ATP. Además, durante el proceso se libera hidrógeno molecular (H_2) como subproducto

(Baca et al., 2000).

La fijación de nitrógeno está acompañada por la reducción de H^+ a H_2 en todos los sistemas donde se ha estudiado. Sin embargo, muchos de estos sistemas poseen una enzima llamada hidrogenasa, que permite reciclar el hidrógeno generado. La reacción de reducción del nitrógeno es un proceso endergónico que requiere una energía mínima de 960 kJ por mol de nitrógeno, por lo que debe acoplarse a un sistema que produzca ATP de manera eficiente. El ATP necesario se genera a través de la fosforilación oxidativa, la cual está acoplada a la cadena transportadora de electrones, que utiliza el oxígeno como aceptor final (Fernández et al., 2002).

2.2.7. Asimilación del nitrógeno fijado.

La asimilación del nitrógeno fijado varía según el organismo que lo realice. Estos se agrupan en dos tipos: los microorganismos que fijan nitrógeno de forma libre, actuando solos en el suelo, y aquellos que lo hacen en simbiosis, formando relaciones mutualistas con plantas. En la fijación libre, los microorganismos convierten el nitrógeno atmosférico sin depender de una planta huésped, mientras que, en la fijación simbiótica, el proceso es conjunto con las plantas, permitiendo que ambos se beneficien en la adquisición de nutrientes (Fernández et al., 2002).

2.2.8. Fijación de nitrógeno en vida libre

Entre los microorganismos fijadores de nitrógeno en vida libre se hallan los anaerobios estrictos, anaerobios facultativos y aerobios. En cada uno de estos grupos hay géneros capaces de obtener energía de sustancias químicas, denominados quimiótrofos, o de captarla de la luz, conocidos como fotótrofos (Fernández et al., 2002).

2.2.8.1. Fijación de nitrógeno en simbiosis

Existen tres tipos de asociaciones fijadoras: rizocenosis, simbiosis asociativa y rizoendosimbiosis. La rizocenosis implica la interacción entre microorganismos del suelo, como *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Beijerinckia*, que colonizan el suelo rizosférico y las raíces, aprovechando la alta relación C/N que predomina en este entorno. La simbiosis asociativa involucra géneros como *Anabaena*, *Nostoc* y *Calothrix*, organismos fotótrofos que forman heterocistos, donde se encuentra la nitrogenasa. La rizoendosimbiosis, o simbiosis entre rizobios y leguminosas, aporta el mayor porcentaje de nitrógeno a los ecosistemas terrestres, formando nódulos en las raíces que facilitan la fijación. *Rhizobium spp.* se asocia de manera específica con leguminosas, infectando los pelos radiculares y pasando por

etapas de reconocimiento, infección, desarrollo del nódulo y fijación del nitrógeno (Fernández et al., 2002).

2.2.9. Importancia de los *Rhizobium* spp. en la agricultura

En la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa, los rizobios suministran amonio a las leguminosas a cambio de otros nutrientes, lo cual es crucial, ya que la disponibilidad de nitrógeno suele ser el factor limitante más importante para el crecimiento vegetal. Así, la formación de esta simbiosis tiene gran relevancia tanto desde una perspectiva agrícola como ecológica (Paredes, 2013).

2.2.9.1. *Rhizobium* spp.

Son especies que forman nódulos fijadores de nitrógeno con más leguminosas que cualquier otro microsimbionte. Estas especies pueden adaptarse rápidamente a los cambios ambientales en el suelo, la rizósfera y las plantas. (Rodríguez y Ruiz, 2022).

Young et al. (2021) los rizobios colonizan las células dentro del nódulo y utilizan la energía suministrada por la planta para fijar el nitrógeno (es decir, reducir el N_2 atmosférico a amoníaco, NH_3 y hacer que los compuestos orgánicos de nitrógeno estén disponibles para la planta. Esta es una simbiosis mutuamente beneficiosa, y su importancia para la agricultura ha estimulado la investigación durante más de un siglo.

2.2.9.2. *Rhizobium phaseoli*

Es un microorganismo empleado como inoculante en la producción de *Phaseolus vulgaris* (frijol), ya que en los nódulos de sus raíces establece una simbiosis para fijar nitrógeno molecular (FBN) y cubrir la demanda de nitrógeno, un elemento esencial en la agricultura (Gustavo et al., 2021).

2.2.10. Inoculación de leguminosas

El método empleado para introducir este sistema en la agricultura se conoce como "inoculación". Consiste en aplicar cepas específicas de bacterias *Rhizobium* al suelo o a la superficie de la semilla de la planta huésped, las cuales son altamente infecciosas para ciertas leguminosas y muy eficientes en la fijación de nitrógeno. Esta interacción ofrece un buen rendimiento en condiciones de bajo nitrógeno sin necesidad de fertilización. En la mayoría de los casos, esto es altamente beneficioso para los agricultores debido al alto costo y la limitada disponibilidad de fertilizantes. (Rodríguez y Ruiz, 2022).

2.2.10.1. Método del espolvoreado

En este método, los agricultores no emplean pegamentos. Simplemente mezclan inoculantes secos en polvo, como los basados en turba, con la semilla seca sin agregar líquido. Este método de inoculación es el menos eficaz, ya que el inoculante seco no se adhiere bien a la semilla, y la mayor parte de él se perderá durante la siembra (Rodríguez y Ruiz, 2022).

2.2.10.2. El método de la suspensión

En este método de suspensión para aplicar el inoculante, se prepara una mezcla de inoculante y agua, junto con una solución de sellado. Justo antes de la siembra, se mezclan las cantidades medidas de solución e inoculante para formar una suspensión líquida. Esta suspensión se vierte en un recipiente con semillas y se agita continuamente hasta que queden uniformemente recubiertas. La suspensión debe agregarse en pequeñas cantidades, ya que un exceso de solución podría hacer que las semillas se agrupen o se hinchen (Rodríguez y Ruiz, 2022).

2.2.10.3. El método de dos pasos

En este método de dos pasos, el adhesivo y el inoculante en polvo se aplican a la semilla por separado. En la primera etapa, las semillas se cubren uniformemente con la solución adhesiva; en la segunda etapa, se añade el inoculante en polvo a las semillas tratadas. Este método es particularmente útil cuando se requiere aplicar una gran cantidad de rizobios a la semilla (Rodríguez y Ruiz, 2022).

2.2.10.4. Peletización de semillas

A veces resulta beneficioso recubrir semillas de frijol nativo inoculadas con una capa protectora de cal o fosfato de roca. Primero, el inoculante se aplica como una suspensión espesa o mediante el método de dos pasos con una solución adhesiva. El polvo de cal o fosfato se añade inmediatamente después de la inoculación, mientras las semillas de frijol nativo están aún húmedas. Se mezclan rápidamente con el material granulado hasta que queden completamente cubiertas. Las semillas de frijol nativo en gránulo parecerán secas, pero deben esparcirse sobre un lienzo en un lugar fresco y sombreado para que el gránulo se endurezca antes de sembrar (Rodríguez y Ruiz, 2022).

2.2.11. Fertilización química y requerimientos nutricionales del frijol.

Una adecuada fertilización que considere la fertilidad del suelo, las necesidades del cultivo y sus fases fenológicas asegura los nutrientes esenciales para un buen crecimiento, desarrollo y rendimiento. El momento ideal para aplicar fertilizantes depende del patrón de absorción de nutrientes, tipo de suelo y condiciones

ambientales del área. En el caso del frijol, se sugiere fraccionar la aplicación de fertilizantes y hacerlo antes de las fases críticas, para no comprometer el rendimiento del cultivo. Se recomiendan 150kg-90kg unidades de (P_2O_5) -(K_2O) por hectárea (superfosfato triple, cloruro de potasio), en dos aplicaciones (INIA, 2020).

2.3. Definición de términos

2.3.1. Leguminosas

Son plantas que fijan nitrógeno, mejorando la fertilidad y productividad de los suelos agrícolas, lo que promueve una agricultura sostenible y protege el suelo; su cultivo genera una menor huella de carbono y contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, convirtiéndose en un aliado importante en la lucha contra el cambio climático (UNAM, 2021).

2.3.2. Simbiosis

La disponibilidad de nitrógeno asimilable en el suelo ocurre en la rizósfera mediante un diálogo molecular, donde se intercambian moléculas señal entre los simbioses. El nitrógeno atmosférico se convierte en formas asimilables para el suelo. Por esto, la manipulación de esta simbiosis ha sido considerada una estrategia clave para reducir el uso de fertilizantes sintéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante su fabricación (Isidra y Valdés, 2022).

2.3.3. Nodulación

El desarrollo de los nódulos está controlado por tres procesos simultáneos: infección rizobial, organogénesis y autorregulación del número de nódulos. Según la persistencia del meristemo nodular, hay dos tipos de nódulos: los indeterminados, que mantienen su meristemo durante toda la simbiosis, característicos de leguminosas de climas templados como la alfalfa; y los determinados, donde el meristemo es transitorio y desaparece en nódulos maduros. Los nódulos determinados son esféricos y típicos de leguminosas de climas cálidos, como el frijol y la soya (Isidra y Valdés, 2022).

2.3.4. Interacción

La respuesta de un cultivo a la fertilización depende del elemento presente en menor cantidad en el suelo en relación con sus necesidades. Cada factor de producción es más eficaz cuando los demás factores están cercanos a su óptimo. En cuanto a los elementos fertilizantes, la interacción puede ocurrir tanto en el suelo como en la planta. Por ejemplo, en suelos alcalinos, el sulfato y nitrato amónico mejoran la

solubilización del P_2O_5 , y el nitrógeno en forma de NH_4^+ facilita la absorción de anhídrido fosfórico por la planta (UNP, 2015).

2.3.5. Eficiencia

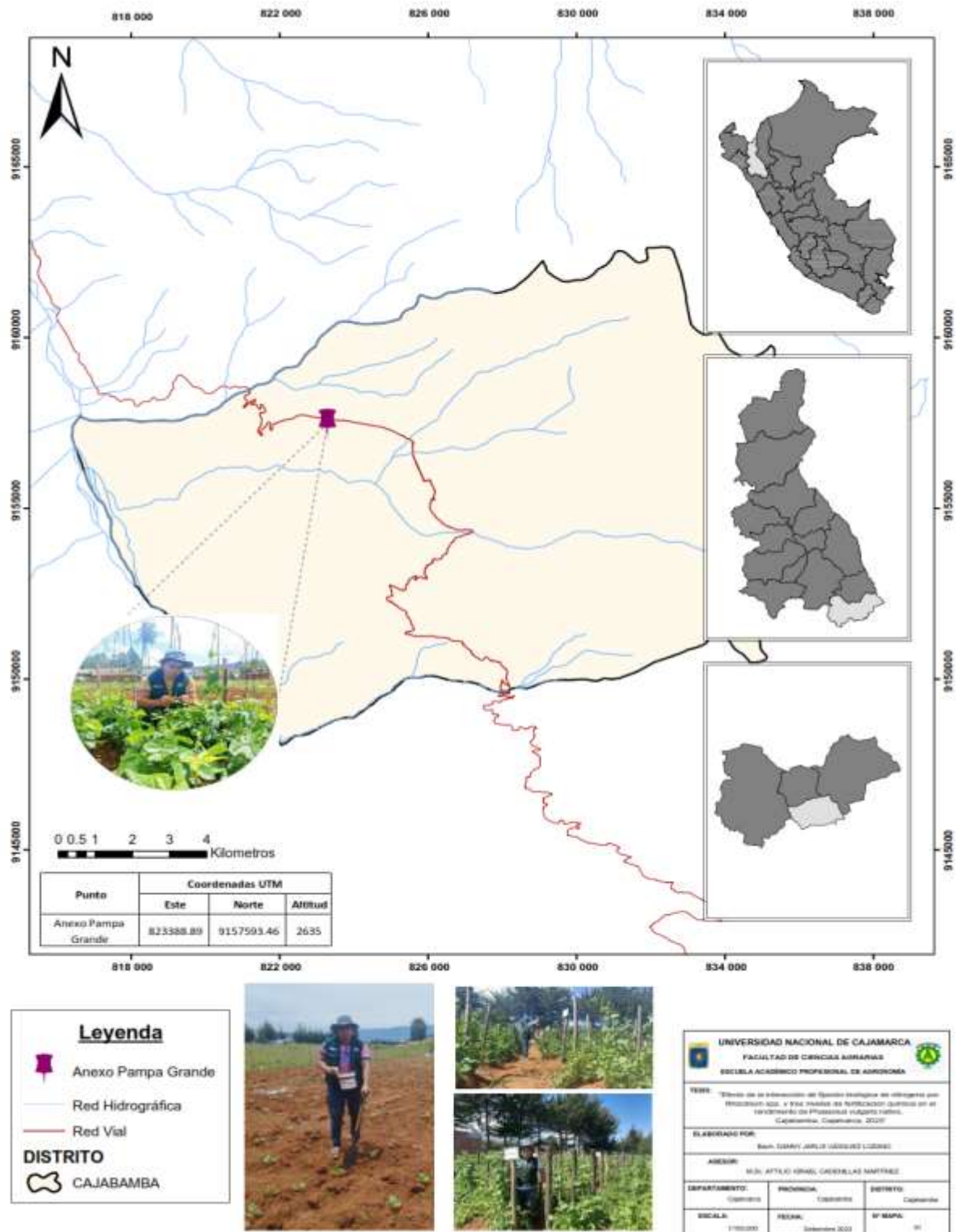
Se estima asignando valores numéricos al tamaño, color y cantidad de nódulos. El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa con baja eficiencia en la fijación biológica de nitrógeno; sin embargo, varios estudios sugieren que existe potencial para mejorar la fijación de nitrógeno mediante la selección de un binomio eficiente entre la planta de frijol y una cepa de *Rhizobium*. En frijol, se han reportado diferencias en los niveles de fijación de nitrógeno entre variedades, que varían entre 7.1 y 106.5 kg ha⁻¹ (López et al., 2020).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

Figura 1

Ubicación del sistema experimental



Nota. Dicho estudio se realizó en la Estación Experimental Baños del Inca – anexo Cajabamba, propiedad del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Esta se encuentra ubicada en la carretera San Marcos – Cajabamba, en el caserío Pampa Larga, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca, a una altitud de 2 635 m s.n.m. Las coordenadas UTM del lugar son: Este 823388.89 m y Norte 9157593.46 m, correspondiente a la zona 17S.

3.2. Materiales

3.2.1. Equipos de protección personal

Estos equipos nos protegieron frente a un riesgo laboral en este caso para el manejo de nuestro experimento, para pesticidas.

- Mameluco
- Guantes
- Mascarilla
- Botas

3.2.2. Materiales de oficina

- Papel bond A4 75 gr.
- Tinta para impresora
- Lapiceros de marca indeleble
- Cuaderno de campo
- Lapicero de tinta
- Lápiz

3.2.3. Materiales y servicio de laboratorio (F-Q y B)

- pH. EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH.
- Acidez y Aluminio Intercambiable. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.3.29, AS-33 2002 Determinación de Acidez y Aluminio Intercambiable (AS-33 método de Cloruro de Potasio).
- Materia Orgánica. NOM-021-RECNAT-2000; 2da Sección. 2002; Ítem 7.1.7 AS-07 2002 Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley y Black)

- Fósforo Disponible. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.10, AS-10 2002 Determinación de fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos (AS-10 Método de Olsen y colaboradores).
- Potasio Disponible. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.12, AS-12 // EPA 6010 D. Revisión 5. 2018). Validado (modificado y aplicado fuera del alcance)
- Conductividad Eléctrica. NTP 214.049:2023 2023 CALIDAD DE AGUA. Conductividad electrolítica en agua. Metodo de ensayo
- Nitrógeno Total Kjeldahl. ISO 11261:1995, First Edition 1995 Soil Quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method
- Metales Totales. EPA Method 3050B: ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS (Rev.2, 1996)// EPA 6010 D. Revision 5. 2018.
- Analisis proximal. Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos (FAO) 1993, Análisis proximales (Weende), Cap 3, Sec. 3.1, Humedad)
- Proteína. (ISO 11261 INTERNATIONAL STANDARD Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method (First edition 1995-03- 01), cálculo de proteina por Proximal de Wendee)
- Bolsas de papel
- Bolsas ziplock

3.2.4. Material biológico

Para este experimento utilizamos semilla de frijol nativo (Tiachos bayo) que viene a ser una leguminosa arbustiva, también vamos a utilizar microorganismos.

- Semilla de *Phaseolus vulgaris*. nativo (Tiachos bayo).
- Bacterias *Rhizobium phaseoli-UNC1*, *Rhizobium phaseoli-CIAT2*.

3.2.5. Fertilizantes

Se incorporó los fertilizantes de acuerdo a los tratamientos trabajados en dicho experimento.

- Superfosfato triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
- Cloruro de potasio K_2O

3.2.6. Manejo del Campo

- Alambre galvanizado
- Rafia
- Madera de 2 pulgada por 1.5 metros
- Cordel
- Mano de obra
- Wincha
- Valde 20L
- Maquinaria agrícola

3.3. Metodología

3.3.1. Definición de variables

- **Variable independiente:**
Fijación biológica de nitrógeno
Niveles fertilización
- **Variable dependiente:**
Rendimiento del cultivo

3.3.2. Diseño experimental

El experimento se planteó con bloques completamente al azar con arreglo factorial (3 x 3), (Tabla 1). El primer factor consiste en la cepa de inóculo (*Rhizobium*): CIAT2, UNC1 y sin inóculo. El segundo factor consistió en la dosis de fertilización, fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O), cuyos niveles consistieron en la aplicación del 100%, 50% y 0% de la dosis recomendada, como se detalla en la siguiente sección, 150 kg ha^{-1} de (P_2O_5) y 90 kg ha^{-1} de potasio (K_2O), (INIA, 2020). En total, se trabajó con 27 unidades experimentales, que corresponden a parcelas de 4 m de largo y 3 m de ancho, separadas a un metro de distancia entre filas y columnas.

3.3.3. Descripción del experimento

Tabla 1

Factores experimentales y niveles aplicados para evaluar la interacción de cepas de Rhizobium spp. y fertilización NPK en Phaseolus vulgaris nativo

FACTORES	NIVELES
Cepa de Rhizobium	Sin Rhizobium
	Rhizobium phaseoli-UNC1.
	Rhizobium Phaseoli-CIAT2.
Niveles de fertilización, Fósforo(P), Potasio (K)	0% (sin fertilización)
	50% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)
	100% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)

Nota. En el experimento se empleó dos factores que vienen a ser las cepas de Rhizobium sp. y los niveles de fertilización mineral con niveles diferentes que nos van a proporcionar los diferentes tratamientos.

Tabla 2

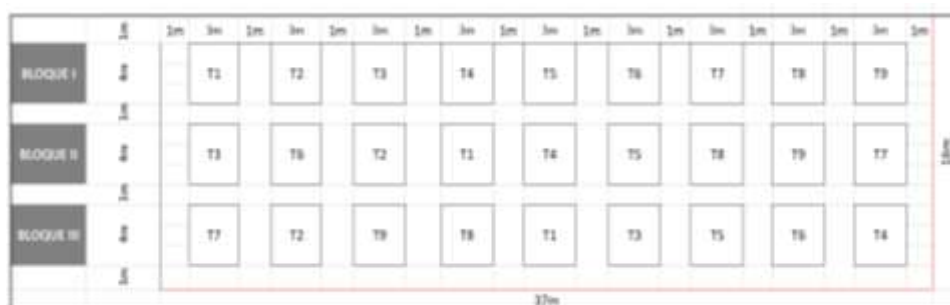
Distribución de tratamientos experimentales según cepa de Rhizobium spp., nivel de fertilización (P₂O₅)-(K₂O) y número de repeticiones en Phaseolus vulgaris nativo, Cajabamba – Cajamarca

Nº	Código	Cepa de Rhizobium	Dosis	Repeticiones
1	T0	Sin inoculacion-0% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	0 gramos	3
2	T1	Sin inoculacion-50% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	27 gramos	3
3	T2	Sininoculacion-100% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	54 gramos	3
4	T3	RhizobiumUNC-1-0% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	0 gramos	3
5	T4	RhizobiumUNC-1-50% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	27 gramos	3
6	T5	RhizobiumUNC-1-100% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	54 gramos	3
7	T6	RhizobiumCIAT-2-0% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	0 gramos	3
8	T7	RhizobiumCIAT-2-50% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	27 gramos	3
9	T8	RhizobiumCIAT-2-100% (P ₂ O ₅) - (K ₂ O)	54 gramos	3

Nota. Los tratamientos que se realizó en dicho experimento son 9 tratamientos, pero cada tratamiento esta replicado por 3 repeticiones, el T0 actua como testigo del experimento.

Figura 2

Diseño experimental y distribución espacial del área de campo para la evaluación de Rhizobium spp. y niveles de fertilización en Phaseolus vulgaris.



Nota. El area donde se realizó el trabajo de investigación tiene una longitud de 16m de ancho y 37m de largo y un total de 592m²

3.3.4. Conducción del experimento

3.3.4.1. Analisis del suelo

Tabla 3

Análisis de suelo

Parámetro	Unidad	Resultados
pH.	unid. pH	6,6
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	--
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	--
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,8
Conductividad Eléctrica	mS/m	19.1
Materia Orgánica	%	3,4
Fósforo Disponible	mg/kg	3,4
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg.g-1	1,5
Potasio disponible (*)	mg.kg-1	598,9
Arena	%	46
Arcilla	%	26
Limo	%	28
Clase Textural	-	Franco Arcillo Limoso
Potasio Disponible (*)	mg/kg	421,03

El análisis de suelo indica un pH de 6,6, adecuado para frijol, sin problemas de acidez ni toxicidad por aluminio. La materia orgánica es buena (3,4 %) y el nitrógeno total es moderado (0,15 %), pudiendo complementarse con fijación biológica. El potasio es (421–599 mg/kg), por lo que requiere aplicación mínima adicional. La textura franca arcillo-limosa es favorable para el cultivo, aunque requiere buen manejo de riego. La principal limitante es el fósforo disponible (3,4 mg/kg), muy bajo, lo que hace necesaria la aplicación de fertilizantes fosfatados para asegurar un buen rendimiento.

La dosis de fertilización con fósforo y potasio se determinó a partir del análisis de suelo y del manejo convencional, se estableció que el frijol nativo requería 713 kg ha^{-1} de superfosfato triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y 67 kg ha^{-1} de cloruro de potasio K_2O . Para favorecer la infección natural de las bacterias fijadoras de nitrógeno, se omitió la aplicación de urea, generando así condiciones de déficit de nitrógeno.

3.3.4.2. Preparación del terreno

- Se Identificó área donde se va a sembrar.
- Se realizó un análisis de suelo.
- Se realizó el arado del terreno, diversas cruzas para mullir y allanar el terreno para que quede en forma para la siembra del cultivo.

3.3.4.3. Delimitación del campo experimental

El día 06 de febrero de 2024, se realizó la delimitación del área experimental mediante un procedimiento que involucró el uso de cordel y cal agrícola. Se trazaron cuidadosamente tanto el perímetro como las divisiones internas de los tres bloques experimentales y de cada uno de los tratamientos específicos. Esta actividad fue fundamental para establecer las parcelas de forma precisa y garantizar la correcta distribución de los tratamientos en el área, siguiendo el diseño experimental planifica.

3.3.4.4. Inoculación de *Rhizobium phaseoli* (UNC1-CIAT2).

Se utilizó el método de suspensión para aplicar el inoculante. Se preparó una suspensión mezclando inoculante y agua, junto con una solución de sellado. Justo antes de la siembra, las cantidades medidas de la solución e inóculo se mezclan bien para formar una suspensión fluida. Esta suspensión se incorporó en un recipiente con la semilla y se agitó constantemente hasta que las semillas

quedaron uniformemente recubiertas. La suspensión se añadió en pequeñas cantidades para evitar que las semillas se agrupen o se hinchen debido al exceso solución (Rodríguez y Ruiz, 2022).

3.3.4.5. Siembra

El tipo de siembra se realizó de forma manual el 07 de febrero de 2024 después de haber sido inoculadas con las cepas de *Rhizobium*, se hizo surcos a una distancia de 80 centímetros entre sí, con dos semillas por golpe a una distancia de 45 centímetros entre planta y fueron soltando dos de dos espaciadas a lo largo del surco distribuidas uniformemente de acuerdo a la densidad de siembra.

3.3.4.6. Primera fertilización

La primera fertilización se llevó a cabo diez días después de la siembra, justo después de la emergencia de las plántulas. Según las recomendaciones obtenidas a partir del análisis de suelo, 713 kg ha^{-1} de superfosfato triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y 67 kg ha^{-1} de cloruro de potasio K_2O , la aplicación para este cultivo que abarca 592 m^2 fue de 42.5 kg de superfosfato triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y 4 kg cloruro de potasio K_2O . La mezcla de fertilizantes (P_2O_5) -(K_2O) debe aplicarse a una dosis de 54 g por golpe, manteniendo una distancia de 10 cm de la planta. Se incorporó la mitad de la dosis recomendada, (27 gramos por planta a los tratamientos que son al 100% (P_2O_5) -(K_2O) y a los tratamientos que son al 50% de (P_2O_5) -(K_2O) solo se aplicó 13.5 gramos de (P_2O_5) -(K_2O), sin embargo, la fertilización se limitó únicamente al superfosfato triple y al Cloruro de potasio, omitiendo el nitrógeno, con el objetivo de no interferir en los resultados del estudio experimental.

3.3.4.7. Deshierbo o control de malezas

El deshierbo se realizó 25 días después de la siembra, cuando las plántulas de frijol ya habían emergido y las malezas comenzaban a desarrollarse. La labor de deshierbo se llevó a cabo manualmente, enfocándose en los espacios entre hileras. Este proceso fue esencial para evitar la competencia de las malezas por nutrientes, agua y luz, factores cruciales especialmente en las etapas tempranas de crecimiento del frijol. Un control adecuado de malezas es fundamental, ya que su presencia puede reducir de manera significativa el rendimiento del cultivo. Además, el deshierbo oportuno contribuye a mejorar la calidad del cultivo de frijol, facilitando un desarrollo más uniforme y favoreciendo las

condiciones del suelo, lo que se traduce en un rendimiento óptimo del cultivo.

3.3.4.8. Segunda fertilización

La segunda fertilización se realizó 40 días después de la siembra, incorporando la mitad restante de potasio y fósforo según el plan de fertilización recomendado (27 gramos por planta a los tratamientos que son al 100% (P_2O_5) - K_2O y a los tratamientos que son al 50% de (P_2O_5) - K_2O solo se aplicó 13.5 gramos de (P_2O_5)- K_2O . En esta aplicación, se limitó el uso de fertilizantes únicamente a superfosfato triple y cloruro de potasio, omitiendo el nitrógeno para evitar interferencias en los resultados del estudio experimental en curso.

3.3.4.9. Aporque

El aporque se realizó 45 días después de la siembra en el cultivo de frijol. Esta práctica consistió en amontonar tierra alrededor de la base de las plantas para proporcionarles soporte y estabilidad, previniendo el acame por viento o lluvias intensas. Además, facilitó el crecimiento radicular y aumentó la absorción de nutrientes y agua. También redujo la competencia de malezas y conservó la humedad del suelo, aspectos importantes en regiones secas. En conjunto, esta técnica buscó mejorar el rendimiento y la calidad en la producción de vainas.

3.3.4.10. Tutorado

El tutorado se llevó a cabo 48 días después de la siembra como parte del manejo agronómico del cultivo. Para esto, se instalaron soportes de madera en los extremos de los surcos, unidos con alambre galvanizado. Las plantas, de crecimiento arbustivo, fueron guiadas hacia arriba utilizando rafia, lo que facilitó su desarrollo vertical y mejoró la exposición a la luz. Esta técnica también ayudó a mantener las plantas organizadas y separadas del suelo, reduciendo la infección por enfermedades y competencia por espacio y mejorando el flujo de aire entre ellas.

3.3.4.11. Riego

El riego se realizó cada 15 días en las últimas etapas fenológicas del cultivo, dado que la siembra ocurrió fuera de la época óptima. Esto tuvo como finalidad fortalecer la formación y el llenado de granos, etapas en las que la demanda hídrica es alta y la falta de agua podría haber provocado aborto de flores y vainas, además de afectar el tamaño y calidad de los granos y reducir el rendimiento final. Este manejo hídrico también se hizo para favorecer la fijación biológica de nitrógeno (FBN), ya que la humedad adecuada estimula la actividad de las rizobias, mejorando la nutrición del cultivo y reduciendo la necesidad de

fertilizantes nitrogenados.

3.3.4.12. Control fitosanitario

El control fitosanitario se realizó de manera preventiva y de control con la finalidad no afectar en el rendimiento y así asegurar la calidad del grano.

En cuanto a las plagas que tuvieron incidencia en el cultivo tenemos las siguientes que se pudo identificar

Empoasca kraemeri, o "lorito verde", afectó al cultivo de frijol al alimentarse de la savia de las hojas, provocando amarillamiento, enrollamiento, reduciendo la fotosíntesis y afectando el crecimiento, Sin embargo, gracias a un control a tiempo, se lograron minimizar los daños y proteger el rendimiento del cultivo.

Aphis fabae "Pulgón", es vector de diversas enfermedades virales, que pueden afectar gravemente el rendimiento y la calidad del frijol. Sin embargo, gracias a un control a tiempo y un manejo integrado de plagas ayudó a controlar esta plaga y a reducir los daños en el cultivo.

Bemisia tabaco "mosca blanca", es una plaga importante por su capacidad para causar daños directos e indirectos. Al alimentarse de la savia de las hojas, debilita la planta y reduce el rendimiento del cultivo. Además, produce melaza, que favorece el crecimiento de hongos como la fumagina, disminuyendo la fotosíntesis y debilitando aún más el cultivo. Sin embargo, gracias a un control oportuno, se lograron minimizar los daños y proteger el rendimiento del cultivo.

3.3.4.13. Cosecha

La cosecha se realizó en días diferentes, dependiendo del momento en que cada tratamiento alcanzó su madurez de cosecha. Para el tratamiento T0, se cosechó a los 141 días; T1, a los 145 días; T2 y T3, a los 146 días; T4, a los 148 días; T5, a los 147 días; T6, a los 144 días; T7, a los 152 días; y T8, a los 158 días, estableciendo este último como el tiempo máximo de madurez en los bloques experimentales. Las vainas se recolectaron manualmente y se llevaron a secar; posteriormente, se realizó un proceso de venteado para eliminar impurezas y granos dañados. Luego, el pesaje y registro de los granos, permitiendo evaluar el rendimiento de cada tratamiento.

3.3.5. Parámetros de evaluación

3.3.5.1. Número de días a la emergencia

Se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas hayan emergido. En esta actividad se hizo uso de la observación

directa y registro en la libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.2. Número de días a la aparición del botón floral

Se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas alcanzaron la aparición de botón floral. En esta actividad se hizo uso de la observación directa y registro en la libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.3. Número de días a la de floración

Se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas lograron la floración. En esta actividad se hizo uso de la observación directa y registro en la libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.4. Número de días a la madurez fisiológica

Se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas alcanzaron la madurez fisiológica. En esta actividad se hizo uso de la observación directa y registro en la libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.5. Número de días a la madurez de cosecha

Se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas alcanzaron la madurez de cosecha. En esta actividad se hizo uso de la observación directa y registro en la libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.6. Numero de nódulos

Se realizó la cuantificación de los nódulos totales en plantas seleccionadas al azar de cada tratamiento. Para ello, las raíces fueron cuidadosamente lavadas con abundante agua, asegurando la eliminación completa de los restos de tierra, con el fin de facilitar la identificación y conteo preciso de los nódulos. Se hizo un registro de los datos adquiridos. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.7. Color de nódulos

el color de los nódulos se determinó mediante la observación directa, dependiendo del tamaño de los nódulos; para estructura interna se utilizó una lupa y un microscopio para observación de manera más detallada, también se empleó la cartilla de colores (o escala de colores) de Munsell que es útil en la determinación del color de los nódulos.

3.3.5.8. Altura de la planta

La altura de la planta se determinó midiendo la distancia entre la base del tallo (a nivel del suelo) y el punto más alto de la planta, en este caso el ápice del tallo principal, para esto se seleccionaron plantas representativas al azar de cada tratamiento experimental. Se utilizó una cinta métrica, luego se hizo el registro de datos en una libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.9. Peso de grano seco por planta

Se eligieron plantas al azar de cada tratamiento experimental, las plantas seleccionadas fueron representativas; se realiza la extracción completa de los granos luego se secaron en una estufa a un promedio de 30 °C por 72 horas hasta alcanzar peso constante luego mediante una balanza digital de precisión pesamos, luego registramos el peso del grano de cada planta en una hoja Excel de nuestro dispositivo electrónico. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.10. Número de plantas por tratamiento

Se realizó un conteo manual de todas las plantas dentro del área asignada a cada tratamiento, se hizo fila por fila para garantizar precisión y evitar omisiones o duplicaciones. Una vez que hemos realizado el conteo inicial, se repite el procedimiento para confirmar la exactitud de los datos. Los datos obtenidos se registraron en una libreta de campo. Una vez recolectados los datos, se ordenó, sistematizó y analizó estadísticamente.

3.3.5.11. Rendimiento de grano seco kg ha⁻¹

Se desenvainaron los granos de forma manual de todas las plantas del tratamiento experimental, luego secamos bajo condiciones ambientales hasta alcanzar un contenido de humedad estándar generalmente, luego se eliminan residuos, como impurezas, cáscaras o material vegetal no deseado, para obtener grano limpio. El grano seco se pesa una balanza digital de precisión y así determinamos el peso por tratamiento, el peso seco obtenido se estima a rendimiento por hectárea utilizando la fórmula:

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\text{Peso seco (kg)}}{\text{Área cosechada (m}^2\text{)}} \right) \times 10\,000$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Interacción de *Rhizobium phaseoli*-UNC1 y tres niveles de fertilización en rendimiento de *Phaseolus vulgaris*

El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la Tabla 4, evidenció que tanto el Factor A (Cepa de *Rhizobium*) y Factor B (Niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O) nos ha mostrado en la Tabla 4, que la cepa de *Rhizobium* ($p=0.0003$) como los niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O) ($p<0.0001$) afectan significativamente el rendimiento (t ha⁻¹), mientras que su interacción no resulta significativa ($p=0.2396$), evidenciado en la Figura 3, la no interacción entre la cepa de *Rhizobium* y los niveles de fertilización con fósforo y potasio (P₂O₅)-(K₂O) y así indicando que el efecto de la fertilización sobre el rendimiento es independiente de la cepa utilizada.

Con relación al primer objetivo específico, se realizó un análisis de varianza para los tratamientos (Tabla 5), donde revela un efecto altamente significativo de los tratamientos ($p < 0.0001$) sobre el rendimiento del cultivo, demostrando que las diferentes combinaciones entre cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen considerablemente en la producción t ha⁻¹. En la Tabla 6 se observa que los tratamientos con *Rhizobium phaseoli* UNC-1 mostraron rendimientos diferenciados estadísticamente ($p < 0,05$) según la prueba de Tukey al 5 %, agrupados en las letras A, B, C y D. El mayor valor para esta cepa correspondió al tratamiento 5 UNC-1 + 100 % (P₂O₅)-(K₂O), con 1 930.67 kg ha⁻¹, clasificado con la letra “A”, lo que indica que comparte grupo estadístico con otros tratamientos de igual letra, pero es el rendimiento más alto de UNC-1. Le siguió el tratamiento 4 UNC-1 + 50 % (P₂O₅)-(K₂O), con 1 752.67 kg ha⁻¹ (letra “B”), superior a los tratamientos con letras “C” y “D”, y posterior a ellos está el tratamiento 3 UNC-1 sin fertilización con 1 444.33 kg ha⁻¹ (letra “C”). Este patrón A > B > C > D refleja que, para la cepa UNC-1, el rendimiento aumenta conforme se incrementa la fertilización, confirmando el efecto sinérgico entre una cepa eficiente de *Rhizobium* y una adecuada disponibilidad de (P₂O₅)-(K₂O) en el cultivo de frijol nativo. Los hallazgos de este experimento concuerdan con los estudios de da Silva-Júnior et al. (2018, citado en Palma & Zambrano, 2022) quienes reportaron que la inoculación con cepas de *Bradyrhizobium pachyrhizi* aumentó el rendimiento de 850 a 1 400 kg ha⁻¹. Granda et al. (2024) evaluaron la inoculación con *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* en frijol var. Mantequilla y encontraron que el tratamiento con una combinación de *R. leguminosarum*, *P. fluorescens*

y *B. subtilis* logró 1 237 kg ha⁻¹, un rendimiento comparable al obtenido con fertilización química (1 185 kg ha⁻¹).

Para complementar los resultados, en relación con la capacidad de nodulación (Tabla 7), el análisis de varianza (ANOVA) evidenció que tanto la cepa de *Rhizobium* ($p < 0.0001$) como los niveles de fertilización con (P₂O₅)-(K₂O) ($p < 0.0001$) ejercieron un efecto altamente significativo sobre el número de nódulos. Además, se observa una interacción altamente significativa entre ambos factores ($p < 0.0001$), lo que indica que el efecto de la fertilización sobre la nodulación depende de la cepa de *Rhizobium* utilizada, es evidenciado en la Figura 3, donde muestra una clara interacción entre la cepa de *Rhizobium* y los niveles de fertilización con fósforo y potasio (P₂O₅)-(K₂O) sobre el número de nódulos formados, ya que las líneas no son paralelas.

La tabla 8 análisis de varianza indica que existe un efecto altamente significativo de los tratamientos ($p < 0.0001$) sobre el número de nódulos, lo que demuestra que las distintas combinaciones entre cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen significativamente en la formación de nódulos. En la Tabla 9 se observa que los tratamientos con *Rhizobium phaseoli* UNC-1 presentaron diferencias significativas en el número de nódulos ($p < 0,05$) según la prueba de Tukey al 5 %, agrupados en las letras B, C y D. El mayor valor se obtuvo con UNC-1 + 100 % (P₂O₅)-(K₂O) (T5), con 59.0922 nódulos por planta (letra “B”), seguido por UNC-1 + 50 % (P₂O₅)-(K₂O) (T4), con 42.89 nódulos por planta (letra “C”). El tratamiento UNC-1 sin fertilización (T3) registró 32.05 nódulos por planta (letra “D”), valor inferior a los tratamientos fertilizados, pero superior a la mayoría de controles sin inoculación. Esta secuencia A > B > C indica que, para la cepa UNC-1, el número de nódulos activos aumenta proporcionalmente con el nivel de fertilización (P₂O₅)-(K₂O), lo que confirma que la disponibilidad de fósforo y potasio favorece la nodulación efectiva y la fijación biológica de nitrógeno. Estos resultados coinciden con lo reportado por Cuadros (2016) documentó un máximo de 73 nódulos en plantas inoculadas, destacando la relación entre la nodulación efectiva y la fijación activa de nitrógeno en simbiosis. Prévost (2014) observaron en suelos aluviales nodulación predominante en raíces secundarias de las leguminosas forrajeras inoculadas, con colores internos que variaban de rosado a marrón, lo que evidencia una FBN activa.

4.2. Interacción de *Rhizobium phaseoli*-CIAT2 y tres niveles de fertilización en el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*.

En relación al segundo objetivo específico, en la Tabla 4 también se evidenció efectos altamente significativos de los factores el Factor A (Cepa de *Rhizobium*) ($F = 13.58$, $p < 0.0003$) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5) -(K_2O)) ($F = 39.08$, $p < 0.001$) sobre el rendimiento, en relación al análisis de varianza (ANOVA). Sin embargo, no se detectó interacción significativa entre ambos factores ($F = 1.52$, $p = 0.2396$), lo cual sugiere que sus efectos son independientes, demostrado en la Figura 3.

Así mismo, se efectuó un análisis de varianza para los tratamientos (Tabla 5), el cual evidenció un efecto altamente significativo de los mismos ($p < 0.0001$) sobre el rendimiento del cultivo. Esto indica que las distintas combinaciones entre cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización inciden de manera notable en la producción $t\ ha^{-1}$.

En la Tabla 6 se aprecia que los tratamientos con *Rhizobium phaseoli* CIAT-2 también presentaron rendimientos estadísticamente diferenciados ($p < 0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey al 5 %, agrupados en las letras A, B y C. El mayor valor correspondió a CIAT-2 + 100 % (P_2O_5) -(K_2O) (T8), con $2\ 172.33\ kg\ ha^{-1}$, clasificado con la letra “A”, lo que evidencia que comparte grupo estadístico con otros tratamientos de igual letra, pero representa el rendimiento más alto de la cepa CIAT-2 y de todo el experimento. Le siguió CIAT-2 + 50 % (P_2O_5) -(K_2O) (T7), con $2\ 055.67\ kg\ ha^{-1}$ (letra “A, B”), valor considerable, significativamente mayor que los tratamientos clasificados con la letra “C”. El tratamiento CIAT-2 sin fertilización (T6) alcanzó $1\ 294.67\ kg\ ha^{-1}$, ubicado en el grupo “E, F”, lo que indica un rendimiento menor en ausencia de fertilización, aunque aún superior al tratamiento sin inoculación.

Este patrón $A > B > C$ confirma que, en la cepa CIAT-2, el rendimiento del frijol nativo aumenta en proporción directa al nivel de fertilización (P_2O_5) -(K_2O). Los resultados corroboran que la interacción entre una cepa eficiente de *Rhizobium* y un adecuado suministro de nutrientes esenciales como fósforo y potasio potencia significativamente la productividad del cultivo, en relación con lo reportado por Vélchez (2015), que con la combinación de cepas con fertilización media (E-14 PK y E-10 PK) generó $2\ 746\ kg\ ha^{-1}$ y $2\ 676\ kg\ ha^{-1}$, respectivamente. De manera similar (Ayalew et al., 2021, citado en Palma y Zambrano, 2022) encontraron que la inoculación con la cepa *Bradyrhizobium* CP-24 incrementó significativamente el rendimiento del frijol caupí en 21%, pasando de $2,50\ t\ ha^{-1}$ en el control a $2,69\ t\ ha^{-1}$. Además, el número de vainas por planta aumentó

en 16% y el peso de 100 semillas en 13%, lo que confirma el efecto positivo del inoculante en el desarrollo y la productividad del cultivo. Estos resultados subrayan la capacidad de las cepas para optimizar la productividad incluso con una menor dependencia de fertilizantes químicos.

Para la nodulación, el análisis de varianza (Tabla 7) evidenció efectos altamente significativos tanto del factor cepa de *Rhizobium* ($p < 0.0001$) como de los niveles de fertilización con fósforo y potasio ($p < 0.0001$) sobre el número de nódulos, además de una interacción significativa entre ambos factores ($p < 0.0001$). Esto significa que la respuesta nodular varía en función de la cepa utilizada y del nivel de fertilización aplicado. La Figura 5 respalda este hallazgo, ya que las líneas que representan la interacción no son paralelas, confirmando que la nodulación depende de la combinación específica entre cepa y fertilización.

La Tabla 8 reafirma esta tendencia, al mostrar que los tratamientos ejercieron un efecto altamente significativo ($p < 0.0001$) en la formación de nódulos. En particular en la Tabla 9, los tratamientos con *Rhizobium phaseoli* CIAT-2 alcanzaron valores diferenciados estadísticamente ($p < 0,05$) según la prueba de Tukey al 5 %, agrupados en las letras B, C y D. El mayor promedio se obtuvo con CIAT-2 + 100 % (P_2O_5)-(K₂O) (T8), con 78.35 nódulos por planta (letra “A”), seguido de CIAT-2 + 50 % (P_2O_5)-(K₂O) (T7), con 60.62 nódulos por planta (letra “B”). El menor valor para esta cepa correspondió a CIAT-2 sin fertilización (T6), con 38.59 nódulos por planta (letra “C”), lo que demuestra que la ausencia de fertilización reduce la nodulación, aunque mantiene ventaja frente a otros tratamientos y al testigo.

La secuencia $B > C > D$ indica que, para la cepa CIAT-2, la nodulación efectiva se incrementa conforme se eleva la fertilización (P_2O_5)-(K₂O), lo que resalta la importancia de estos nutrientes en el establecimiento de una simbiosis eficiente. Estos resultados coinciden con los reportes de Rodríguez y Ruiz (2022), quienes evidenciaron respuestas destacables en tratamientos inoculados con *Rhizobium sp.*, como en el tratamiento E10 (50,5 nódulos) y en cepas como CIAT899 (25,3 nódulos). De manera similar, Karoline et al. (2021) encontraron que la cepa CIAT899 produjo en promedio 110.3 nódulos por planta, mientras que las cepas mutantes AzR18 y AzR19 lograron 117.2 y 117.3 nódulos, respectivamente.

4.3. Fijación biológica de sin inoculación de *Rhizobium* sp. y tres niveles de fertilización en el rendimiento *Phaseolus vulgaris*

En la Tabla 6 se aprecia que los tratamientos sin inoculación mostraron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento ($p < 0,05$), con una clara separación en las letras asignadas por la prueba de Tukey. El mayor valor correspondió a los tratamientos sin inoculación correspondió al T2 sin inoculación + 100 % (P_2O_5)-(K₂O), con 1 730.67 kg ha⁻¹, clasificado en los grupos “B, C y D”, lo que indica un rendimiento superior respecto a T1 y T0, aunque sin diferencia frente a algunos tratamientos inoculados que comparten las mismas letras. Le siguió T1 (sin inoculación + 50 % (P_2O_5)-(K₂O), con 1 527.67 kg ha⁻¹, ubicado en los grupos “C, D y E”, lo que refleja un nivel intermedio, significativamente menor que el T2, pero superior a T0. Finalmente, el testigo absoluto T0 (sin inoculación y sin fertilización) alcanzó el menor rendimiento, con 1 008.33 kg ha⁻¹, clasificado con la letra “F”, lo que lo diferencia significativamente de todos los demás tratamientos, evidenciando la importancia de la fertilización química para sostener la producción en ausencia de inoculación.

Este patrón T2 > T1 > T0 confirma que, en los tratamientos sin cepa de *Rhizobium*, la producción depende exclusivamente del aporte de fertilizantes, sin el beneficio adicional de la fijación biológica de nitrógeno. Lo cual Granda (2017) nos da a conocer que el rendimiento agrícola estimado fue significativamente menor sin inoculante bacteriano en relación a los tratamientos con inoculación y fertilización; se obtuvieron rendimientos que oscilan entre los 700 kg ha⁻¹ y 1 000 kg ha⁻¹. Por su parte Rodríguez y Ruiz (2022) refieren que el testigo (sin inoculación con las cepas) y sin fertilización, presentaron un valor promedio de 98,38 g en 100 semillas y un valor promedio de 822,31 kg ha⁻¹; el testigo ofrece un punto de referencia crucial. En consecuencia, aun con fertilización completa, los rendimientos de los testigos resultan inferiores a los alcanzados con inoculación, lo que resalta la ventaja de la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa para mejorar la productividad del frijol nativo.

En cuanto a número de nódulos para los tratamientos sin inoculación, en la Tabla 9, se observa que los tratamientos sin inoculación (T0, T1 y T2) presentaron diferencias significativas en el número de nódulos ($p < 0,05$), de acuerdo con la prueba de Tukey. El mayor valor correspondió a T2 (sin inoculación + 100 % (P_2O_5)-(K₂O), con 26.20 nódulos por planta, clasificado en el grupo “E”, lo que muestra que, aun sin inoculación, la fertilización con (P_2O_5)-(K₂O) estimula cierto grado de nodulación, aunque en niveles muy inferiores a los alcanzados con los tratamientos inoculados. Le siguió T1 (sin

inoculación + 50 % (P₂O₅)-(K₂O), con 23.86 nódulos por planta, también dentro del grupo “E”, indicando que no existen diferencias estadísticas frente a T2, aunque numéricamente se observa una ligera reducción al disminuir la fertilización. Por último, el testigo absoluto T0 (sin inoculación y sin fertilización) registró 15.34 nódulos planta, clasificado con la letra “F”, significativamente menor que T1 y T2, lo que refleja la mínima formación nodular en ausencia de inoculación y fertilización.

Esta tendencia T2 igual T1 > T0 evidencia que, en los tratamientos sin *Rhizobium*, la nodulación depende únicamente de la fertilización química, posiblemente asociada a poblaciones nativas del suelo, pero sin alcanzar la eficiencia observada en las plantas inoculadas. Lo que concuerda con lo indicado por Karoline et al. (2021) reportaron resultados similares, con un máximo de 32 nódulos en controles sin inoculación. Por su parte, de Souza et al. (2021) demostraron que la combinación de *Rhizobium* con Fe₃ O₄ incrementó en 122% los nódulos activos, sugiriendo que la aplicación de ciertos elementos químicos puede potenciar la simbiosis, como es el caso del presente estudio. Estos resultados confirman que la fertilización con (P₂O₅)-(K₂O) favorece tanto la infección natural como la infección de cepas inoculadas de *Rhizobium*.

4.4. Evaluación general de la interacción de fijación biológica de nitrógeno por *Rhizobium* spp. y tres niveles de fertilización química sobre el rendimiento de *Phaseolus vulgaris* nativo

De acuerdo con el objetivo general, los resultados confirman que tanto las cepas de *Rhizobium* spp. como los niveles de fertilización química influyeron de manera altamente significativa en el rendimiento del frijol nativo *Phaseolus vulgaris* “Tiachos bayo”, mientras que la interacción entre ambos factores no resultó significativa (Figura 3). Esto sugiere que el efecto de la fertilización sobre la productividad es independiente de la cepa empleada, aunque ambas variables contribuyen de forma determinante a mejorar el rendimiento.

La combinación más destacada fue CIAT-2 + 100 % (P₂O₅)-(K₂O) (T8), que alcanzó 2 172.33 kg ha⁻¹, seguida de CIAT-2 + 50 % (P₂O₅)-(K₂O) (T7) con 2 055.67 kg ha⁻¹ (Figura 4). Estos valores confirman la eficiencia de la cepa CIAT-2 incluso bajo condiciones de fertilización reducida, superando ampliamente a los tratamientos sin inoculación. En contraste, los testigos sin cepas mostraron rendimientos inferiores, aun con fertilización completa, lo que resalta el rol fundamental de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en la sostenibilidad del cultivo. Resultados similares reportaron Granda

et al. (2023), quienes dan a conocer que en tratamientos con fertilización química de fósforo y potasio obtuvieron un rendimiento promedio de $1\,185,54\text{ kg ha}^{-1}$, casi el doble que el del tratamiento control; que solamente tuvo un rendimiento promedio de $607,11\text{ kg ha}^{-1}$, el más bajo entre todos los tratamientos.

En relación con la nodulación, los análisis evidenciaron un incremento significativo en el número de nódulos en presencia de inoculación (Tabla 8), con predominio de la cepa CIAT-2, que obtuvo los valores más altos (Figura 6). A su vez, la fertilización con (P_2O_5) - (K_2O) potenció la formación de nódulos activos, siendo la dosis completa la que promovió los mejores resultados. Este comportamiento coincide con lo descrito por Lepiz et al. (2024), quienes señalan que la fijación biológica de nitrógeno (FBN) es un proceso natural que puede suministrar hasta el 90% del nitrógeno necesario para algunas leguminosas, por lo que representa una opción sustentable para reducir los efectos adversos de fertilizantes químicos en la agricultura. Por su parte López et al. (2024) refieren que la simbiosis leguminosa-*Rhizobium* es el proceso biológico capaz de convertir nitrógeno atmosférico elemental (N_2) en amonio (NH_4^+), forma aprovechable por las plantas, proceso que puede ser capaz de abastecer en algunos casos hasta 90% de las necesidades de las plantas.

En síntesis, los resultados confirman que la inoculación con cepas eficientes de *Rhizobium*, en combinación con una adecuada fertilización fosfatada y potásica, constituye una estrategia agronómica efectiva para optimizar tanto el rendimiento como la nodulación en frijol nativo, reduciendo la dependencia exclusiva de fertilizantes químicos y aportando un enfoque más sustentable a los sistemas de producción agrícola.

4.5. Variables fenológicas y de crecimiento complementarias

Altura de planta

Los resultados de altura de planta en la Tabla 10, mostraron efectos altamente significativos tanto de la cepa de *Rhizobium* ($F = 83.25$, $p < 0.0001$), como de los niveles de fertilización con (P_2O_5) - (K_2O) ($F = 204.16$, $p < 0.0001$), además de una interacción significativa entre ambos factores ($F = 18.81$, $p < 0.0001$) ejercen efectos altamente significativos en la altura del frijol (*Phaseolus vulgaris*). Además en la Tabla 11, el análisis de varianza muestra un efecto altamente significativo de los tratamientos ($F=74.41$, $p<0.0001$) sobre la altura de las plantas, confirmando que las diferentes combinaciones de cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen considerablemente en este parámetro de crecimiento. En la Figura 7 evidencia interacción clara (líneas no paralelas).

En Tabla 12 y Figura 8 (Tukey) revelan que el T8 (CIAT-2 + 100 % (P₂O₅)-(K₂O) alcanzó la mayor altura 116.33 cm, (letra A), seguida por T7 (CIAT-2 + 50 %) con una altura de 105.33 cm (letra A, B), posterior a ello un T5 (UNC-1 + 100 %) con 95 cm de altura (letra B, C), y un T4 (UNC-1 + 50 %) con 88 cm (letra C). Los tratamientos sin inoculación o sin fertilización destacaron significativamente menos (letras D, E), siendo T0 el más bajo con 56 cm. Esto demuestra que la inoculación con rizobios eficientes y la fertilización adecuada promueven un crecimiento vegetativo vigoroso, siendo CIAT-2 la cepa con mayor capacidad de respuesta. Estos resultados coinciden con Hidri et al. (2019), quienes reportaron incrementos significativos en la altura de *Phaseolus vulgaris* inoculado con *Rhizobium* en comparación con controles no inoculados, debido a una mayor absorción de N y P. Esto también coincide con Mfilinge et al. (2014), quienes documentaron que la inoculación con *Rhizobium* junto a (P₂O₅)-(K₂O) incrementa de manera marcada la altura, el grosor del tallo y contenido de clorofila en frijol.

Días a la floración

En la tabla 13, el análisis de varianza para los días a la floración muestra efectos significativos tanto de la cepa de *Rhizobium* (F=45.34; p<0.0001) como de la fertilización (F=43.65; p<0.0001), además de una interacción relevante (F=8.21; p=0.0006). En la Figura 9 de interacción, indica que CIAT-2 retrasa la floración con fertilización creciente y el tratamiento sin inoculación presenta un efecto intermedio constante. En la Tabla 14 análisis de varianza revela un efecto altamente significativo de los tratamientos (F=31.63, p<0.0001) sobre el tiempo de floración, demostrando que las distintas combinaciones de cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización modifican sustancialmente este parámetro fenológico. En la Tabla 15 y Figura 10 (Tukey), el T8 (CIAT-2 + 100 %) presenta la floración más tardía a los 93.67 días, letra “A”, mientras que el T7 (CIAT-2 + 50 %) a los 89 días, grupo B, de manera posterior UNC-1 y sin inoculación esta entre 81 y 86 días, grupo “C, D”, mientras que el Testigo absoluto (T0) florece más temprano a los 75.67 días, grupo “E”. Esto evidencia que la combinación de inoculación y fertilización modula el desarrollo fenológico del cultivo, pudiendo acelerar o retrasar el inicio reproductivo según la interacción de factores. Resultados similares fueron encontrados por Otto et al. (2019), quienes observaron que la inoculación con rizobios eficientes retrasó la floración en frijol común al mejorar la nutrición nitrogenada y prolongar la fase vegetativa. De manera complementaria, Wang et al. (2023) reportaron que la aplicación combinada de *Rhizobium* y fósforo alteró significativamente la fenología de *Phaseolus vulgaris*, confirmando que la interacción simbiótica influye en la transición a la etapa reproductiva.

Días a la madurez de cosecha

Los resultados para días a la madurez en la Tabla 16 confirma efectos altamente significativos de la cepa de *Rhizobium* ($F=82.49$; $p<0.0001$), de la fertilización ($F=76.66$; $p<0.0001$) y de su interacción ($F=20.6$; $p<0.0001$). En la Figura 11 muestra que con CIAT-2 el ciclo se prolonga con más fertilización y los tratamientos sin inoculación presentan un aumento moderado. La Tabla 17 análisis de varianza muestra un efecto extremadamente significativo de los tratamientos ($F=92.85$, $p<0.0001$) sobre el tiempo de madurez. En la Tabla 18 y Figura 12 (Tukey), El tratamiento T8 (CIAT-2 + 100 % (P_2O_5)-(K₂O) prolongó el ciclo hasta 156 días, grupo “A”, mientras que el testigo absoluto T0 alcanzó la madurez más temprana en 140.33 días, grupo “F”. Esto confirma que la inoculación con rizobios eficientes, en combinación con dosis completas de fertilización, puede prolongar el ciclo del frijol, favoreciendo la acumulación de biomasa y el rendimiento final, aunque puede retrasar la cosecha en ambientes limitados. En la misma línea, Mariotti et al. (2020) observaron que la fertilización con fósforo, junto con inoculación microbiana, retrasó la madurez en leguminosas, traducándose en mayor rendimiento. Álvarez (2022) reportó que las etapas fisiológicas presentaron mejoras significativas bajo tratamientos inoculados, donde la cepa LMT10 incrementó la biomasa y amplió la maduración fisiológica (60-68 días).

Tabla 4

Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de Rhizobium) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K₂O)), en la variable rendimiento $t\ ha^{-1}$.

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Cepa de <i>Rhizobium</i>	824960.67	2	412480.33	13.58	0.0003 **
Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)	2374773.56	2	1187386.78	39.08	<0.0001 **
Cepa de <i>Rhizobium</i> *Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)	184212.44	4	46053.11	1.52	0.2396 ns
Error	546864	18	30381.33		
Total	3930810.67	26			

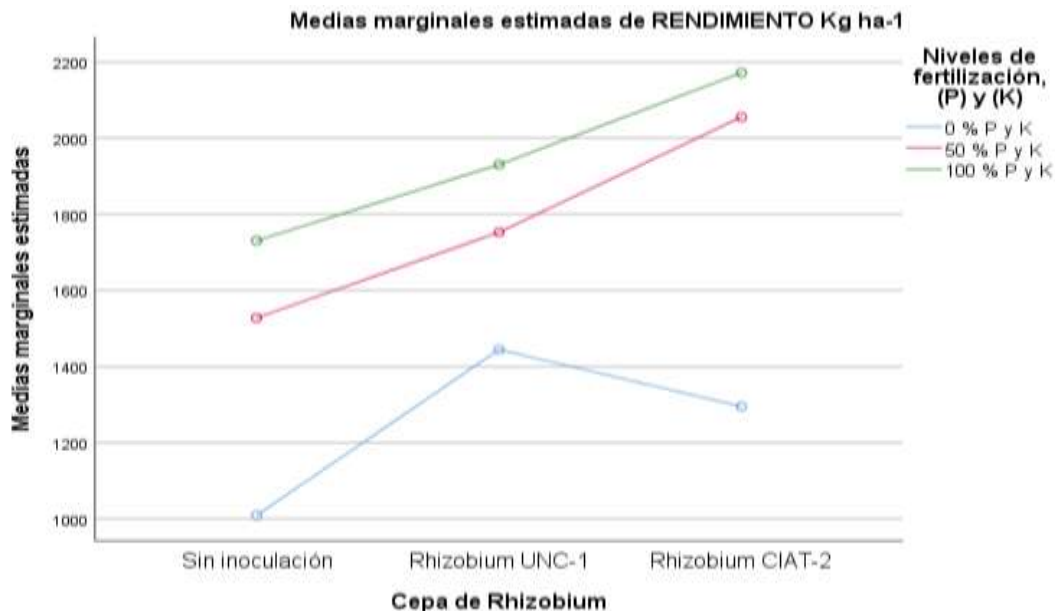
CV. 10.52

La Tabla 4 análisis de varianza, revela que tanto la cepa de *Rhizobium* ($p=0.0003$) como los niveles de fertilización (P_2O_5)-(K₂O) ($p<0.0001$) afectan significativamente el

rendimiento $t\ ha^{-1}$, mientras que su interacción no resulta significativa ($p=0.2396$), indicando que el efecto de la fertilización sobre el rendimiento es independiente de la cepa utilizada. El CV del 10.52% refleja una variabilidad experimental moderada, lo que respalda la confiabilidad de los resultados.

Figura 3

Interacción de medias marginales estimadas para la variable rendimiento $t\ ha^{-1}$.



La Figura 3 muestra la no interacción entre la cepa de *Rhizobium* y los niveles de fertilización con fósforo y potasio (P_2O_5)-(K₂O) sobre el rendimiento del cultivo ($kg\ ha^{-1}$), ya que las líneas son relativamente paralelas principalmente en el nivel de fertilización de 0 % de (P_2O_5)-(K₂O) que varía según la cepa utilizada. La cepa CIAT-2 alcanzó los mayores rendimientos en todos los niveles de fertilización, destacando especialmente con el 100 % de (P_2O_5)-(K₂O); en tanto que la cepa UNC-1 mostró un rendimiento intermedio, y el tratamiento sin inoculación presentó los valores más bajos, aunque también con una mejora progresiva frente al incremento de fertilización. Estos resultados evidencian que la eficacia de la fertilización depende del tipo de cepa utilizada.

Tabla 5

Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable rendimiento t ha⁻¹.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Tratamientos	3383946.67	8	422993.33	19.2	<0.0001 **
Bloques	194414.89	2	97207.44	4.41	0.0298 ns
Error	352449.11	16	22028.07		
Total	3930810.67	26			

CV. 8.95

El análisis de varianza (Tabla 5) revela un efecto altamente significativo de los tratamientos ($p < 0.0001$) sobre el rendimiento del cultivo, demostrando que las diferentes combinaciones entre cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen considerablemente en la producción (t ha⁻¹). El coeficiente de variación (CV) de 8.95% refleja una variabilidad experimental moderada, lo que confiere solidez y precisión a los resultados obtenidos.

Tabla 6

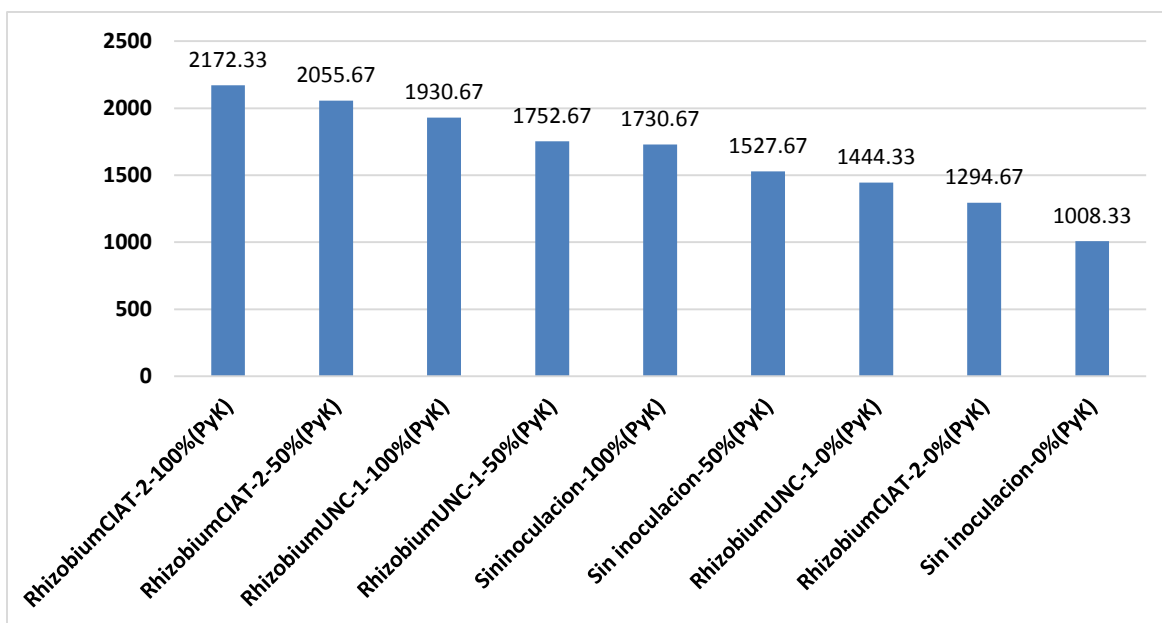
Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable rendimiento kg ha⁻¹.

Clave	Tratamientos	Medias					
T8	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	2172.33	A				
T7	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	2055.67	A	B			
T5	<i>Rhizobium</i> UNC-1-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1930.67	A	B	C		
T4	<i>Rhizobium</i> UNC-1-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1752.67	A	B	C	D	
T2	Sininoculacion-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1730.67		B	C	D	
T1	Sin inoculacion-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1527.67			C	D	E
T3	<i>Rhizobium</i> UNC-1-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1444.33				D	E
T6	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1294.67					E F
T0	Sin inoculacion-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1008.33					F

DMS=431.10450

Figura 4

Histograma de los resultados del rendimiento en kg ha⁻¹ de los tratamientos en estudio.



El análisis de comparación de medias Tukey (Tabla 6) y el histograma (Figura 4) revela que el tratamiento T8 (*Rhizobium* CIAT-2 + 100% (P₂O₅)-(K₂O) alcanzó el mayor rendimiento (2172.33 t ha⁻¹), ubicándose en el grupo estadístico superior (A). Los tratamientos T7 (CIAT-2 + 50% (P₂O₅)-(K₂O) y T5 (UNC-1 + 100% (P₂O₅)-(K₂O) mostraron rendimientos significativamente menores, pero se agruparon en los subgrupos A-B y B-C, respectivamente, indicando un alto desempeño. Los tratamientos con menor fertilización (50% o 0% (P₂O₅)-(K₂O) o sin inoculación presentaron rendimientos progresivamente inferiores, distribuidos en los grupos C a F. Destaca que el testigo absoluto (T0: sin inoculación + 0% (P₂O₅)-(K₂O) registró el menor rendimiento (1008.33 t ha⁻¹), ubicándose en el grupo F.

Tabla 7

Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de Rhizobium) y Factor B (Niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O), en la variable número de nódulos.

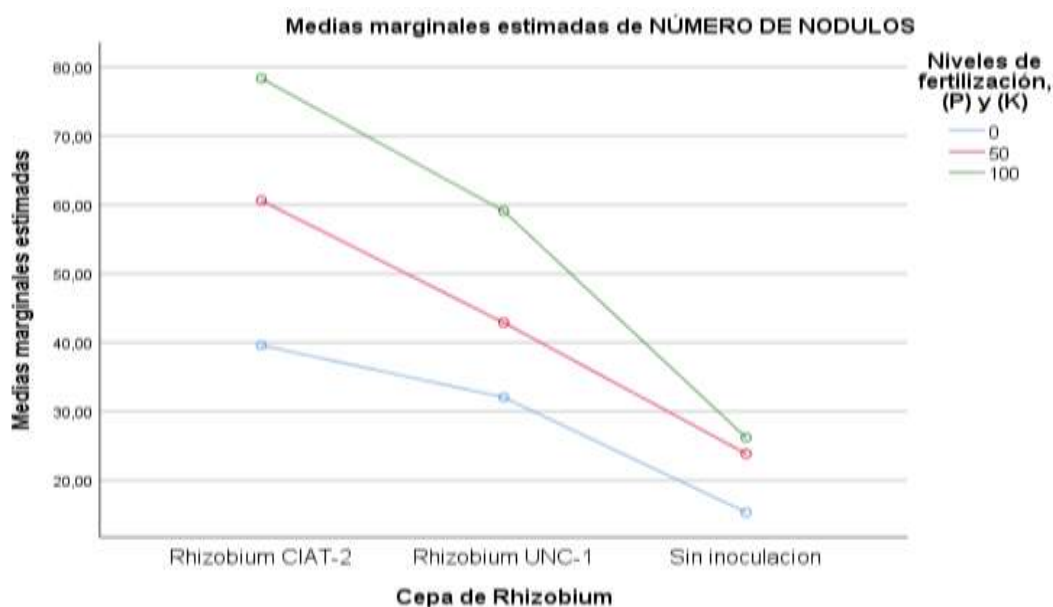
Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Cepa de <i>Rhizobium</i>	2	6498.75	3249.37	600.36	<0.0001
Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	2	2941.2	1470.6	271.71	<0.0001
Cepa de <i>Rhizobium</i> *Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	4	624.97	156.24	28.87	<0.0001
Error	18	97.42	5.41		
Total	26	10162.34			

CV. 5.54

La Tabla 7 análisis de varianza muestra que tanto el factor cepa de *Rhizobium* ($p < 0.0001$) como los niveles de fertilización con (P₂O₅)-(K₂O) ($p < 0.0001$) influyen significativamente en el número de nódulos. Además, se observa una interacción altamente significativa entre ambos factores ($p < 0.0001$), lo que indica que el efecto de la fertilización sobre la nodulación depende de la cepa de *Rhizobium* utilizada. El coeficiente de variación (CV) de 5.54 % sugiere que la variabilidad experimental fue baja, lo que otorga confiabilidad a los resultados obtenidos.

Figura 5

Interacción de medias marginales estimadas para la variable número de nódulos.



La Figura 5 muestra una clara interacción entre la cepa de *Rhizobium* y los niveles de fertilización con fósforo y potasio (P₂O₅)-(K₂O) sobre el número de nódulos formados, ya que las líneas no son paralelas y el efecto de la fertilización varía según la cepa utilizada. La cepa CIAT-2 presentó el mayor número de nódulos en todos los niveles de fertilización, destacando especialmente a nivel del 100 %, mientras que la cepa UNC-1 mostró una respuesta intermedia y el tratamiento sin inoculación generó la menor nodulación, con incrementos más modestos frente a la fertilización. Estos resultados evidencian que la eficacia de la fertilización depende del tipo de inoculante aplicado, confirmando la existencia de una interacción significativa entre ambos factores.

Tabla 8

Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable número de nódulos.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Tratamientos	8	10064.91	1258.11	314.12	<0.0001
Bloque	2	33.34	16.67	4.16	0.0351
Error	16	64.08	4.01		
Total	26	10162.34			

CV. 4.77

La Tabla 8 análisis de varianza indica que existe un efecto altamente significativo de los tratamientos ($p < 0.0001$) sobre el número de nódulos, lo que demuestra que las distintas combinaciones entre cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen significativamente en la formación de nódulos. El coeficiente de variación (CV) de 4.77 % refleja una baja variabilidad experimental, lo cual da solidez y precisión a los resultados obtenidos en este análisis.

Tabla 9

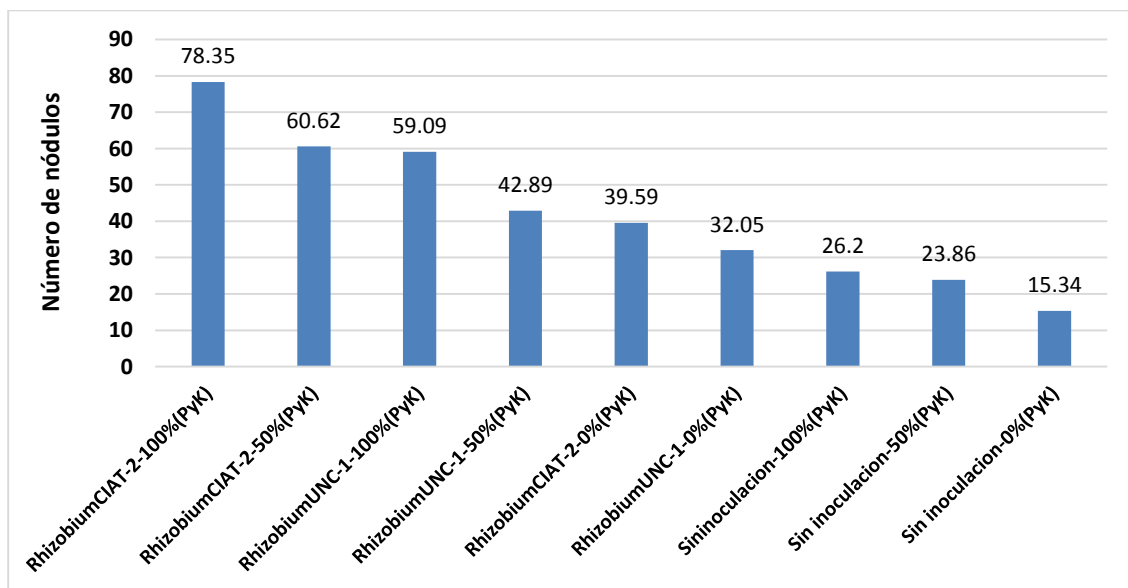
Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable número de nódulos.

Clave	TRATAMIENTO	Medias	
T8	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	78.35	A
T7	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	60.62	B
T5	<i>Rhizobium</i> UNC-1-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	59.09	B
T4	<i>Rhizobium</i> UNC-1-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	42.89	C
T6	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	39.59	C
T3	<i>Rhizobium</i> UNC-1-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	32.05	D
T2	Sininoculacion-100% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	26.2	E
T1	Sin inoculacion-50% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	23.86	E
T0 - testigo	Sin inoculacion-0% (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	15.34	F

DMS. 5.81

Figura 6

Histograma de los resultados de la variable número de nódulos, con los tratamientos en estudio.



El análisis de Tukey (Tabla 9) e histograma (Figura 6) muestra que el tratamiento T8 (*Rhizobium* CIAT-2 con 100 % de (P₂O₅)-(K₂O) obtuvo el mayor número de nódulos y se ubicó en el grupo estadísticamente superior (A). Le siguen T7 y T5 en el grupo B, mientras que los tratamientos con menor fertilización o sin inoculación se distribuyen en grupos C, D y E. El testigo absoluto (T0) presentó la menor nodulación y pertenece al grupo F. Estos resultados confirman que la mayor nodulación se logra con la combinación de *Rhizobium* CIAT-2 y alta fertilización.

Tabla 10

Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de Rhizobium) y Factor B (Niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O), en la variable altura de planta.

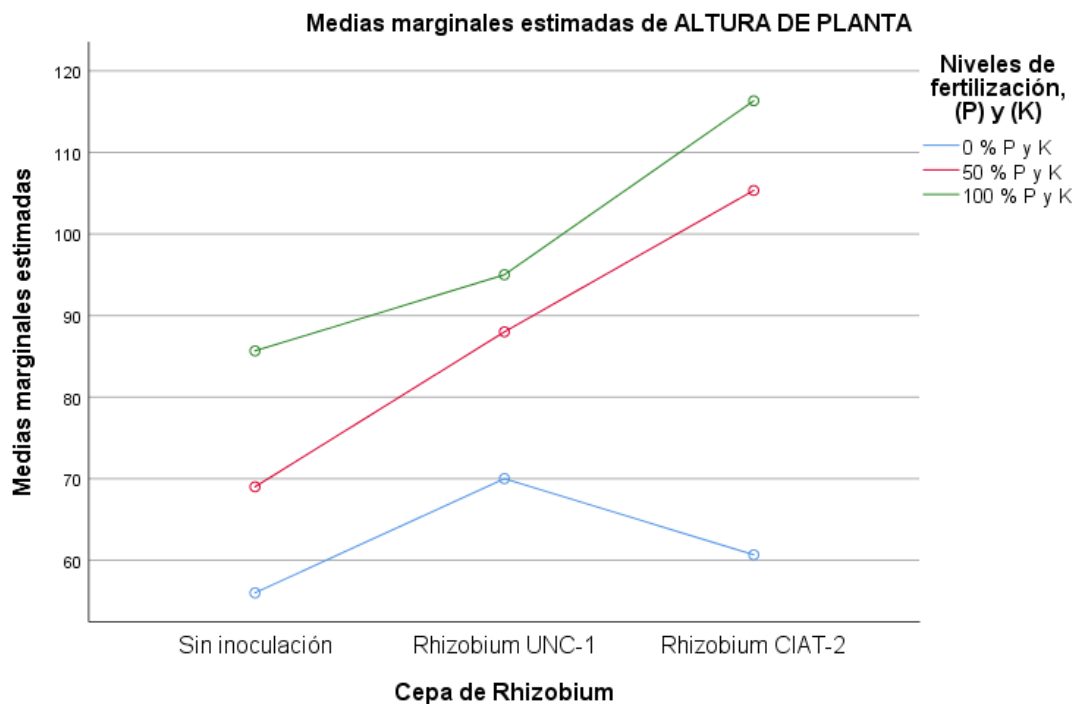
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Cepa de <i>Rhizobium</i>	2596.22	2	1298.11	83.25	<0.0001
Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	6366.89	2	3183.44	204.16	<0.0001
Cepa de <i>Rhizobium</i> *Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	1172.89	4	293.22	18.81	<0.0001
Error	280.67	18	15.59		
Total	10416.67	26			

CV. 4.76

La Tabla 10 análisis de varianza demuestra que tanto la cepa de *Rhizobium* (F=83.25, p<0.0001) como los niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O) (F=204.16, p<0.0001) tienen efectos altamente significativos sobre la altura de las plantas. Además, se detectó una interacción significativa entre ambos factores (F=18.81, p<0.0001), lo que indica que el efecto de la fertilización en la altura depende de la cepa de *Rhizobium* utilizada. El coeficiente de variación (CV) de 4.76% revela una baja variabilidad experimental, lo que confirma la alta precisión y confiabilidad de los resultados. Estos hallazgos sugieren que, para optimizar la altura de las plantas, es crucial considerar combinaciones específicas entre cepas y dosis de fertilización, ya que su efecto conjunto es sinérgico y no simplemente aditivo.

Figura 7

Interacción de medias marginales estimadas para la variable altura de planta (cm).



La Figura 7 muestra una interacción entre la cepa de *Rhizobium* y los niveles de fertilización con fósforo y potasio (P_2O_5)-(K₂O) sobre la altura de planta, ya que las líneas no son paralelas y el efecto de la fertilización varía según la cepa utilizada. La cepa CIAT-2 mostró el mayor incremento en altura con el aumento de fertilización, especialmente al 100 %, mientras que la cepa UNC-1 presentó una respuesta intermedia y el tratamiento sin inoculación registró las menores alturas, aunque con una tendencia ascendente conforme se incrementó la fertilización. Estos resultados confirman que la respuesta en altura de planta depende tanto del nivel de fertilización como de la cepa de *Rhizobium*, evidenciando una interacción significativa entre ambos factores.

Tabla 11

Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable altura de planta.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Tratamientos	10136	8	1267	74.41	<0.0001
Bloques	8.22	2	4.11	0.24	0.7883
Error	272.44	16	17.03		
Total	10416.67	26			

CV. 4.73

La Tabla 11 análisis de varianza muestra un efecto altamente significativo de los

tratamientos ($F=74.41$, $p<0.0001$) sobre la altura de las plantas, confirmando que las diferentes combinaciones de cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización influyen considerablemente en este parámetro de crecimiento. En contraste, el efecto de bloques no resultó significativo ($F=0.24$, $p=0.7883$), lo que indica una homogeneidad adecuada en las condiciones experimentales. El excelente coeficiente de variación ($CV=4.73\%$), por debajo del 5%, refleja una precisión experimental sobresaliente y una variabilidad mínima en los datos, lo que otorga una alta confiabilidad a los resultados obtenidos.

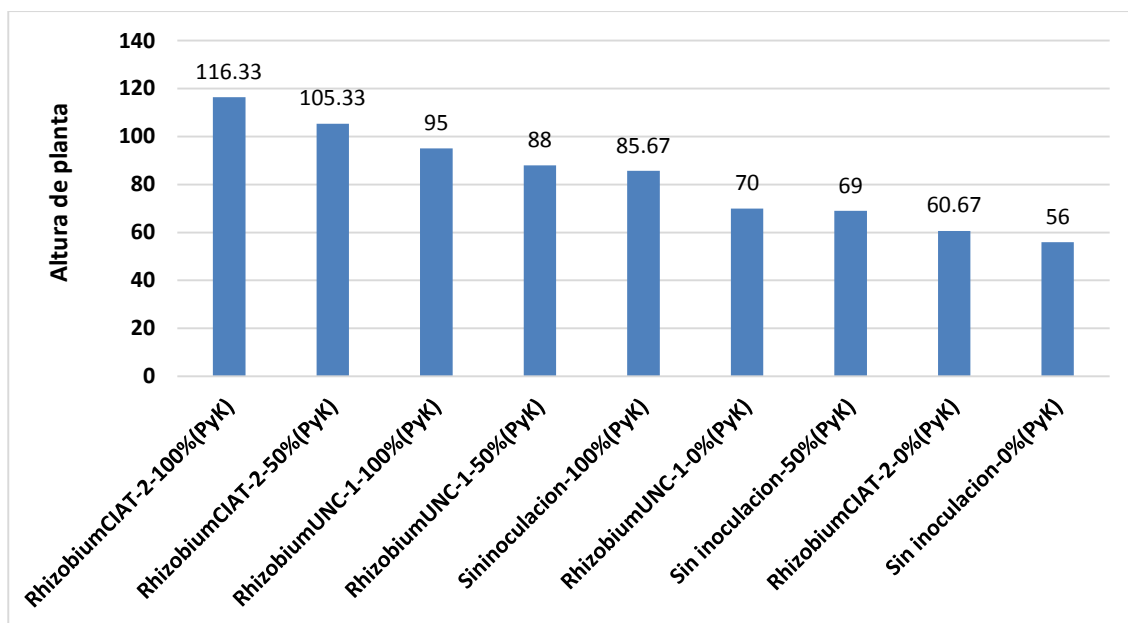
Tabla 12

Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable altura de planta.

Clave	Tratamientos	Medias			
T8	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	116.33	A		
T7	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	105.33	A	B	
T5	<i>Rhizobium</i> UNC-1-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	95		B	C
T4	<i>Rhizobium</i> UNC-1-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	88			C
T2	Sininoculacion-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	85.67			C
T3	<i>Rhizobium</i> UNC-1-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	70			D
T1	Sin inoculacion-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	69			D
T6	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	60.67			D E
T0 - testigo	Sin inoculacion-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	56			E

Figura 8

Histograma de los resultados de la variable altura de planta, con los tratamientos en estudio.



El análisis de Tukey (Tabla 9) e histograma (Figura 6) revela que el tratamiento

T8 (*Rhizobium* CIAT-2 + 100% (P₂O₅)-(K₂O) alcanzó la mayor altura de planta (116.33 cm), ubicándose en el grupo estadístico superior (A), seguido por T7 (CIAT-2 + 50% (P₂O₅)-(K₂O) en el grupo A-B. Los tratamientos T5 (UNC-1 + 100% (P₂O₅)-(K₂O) y T4 (UNC-1 + 50% (P₂O₅)-(K₂O) se agruparon en B-C y C respectivamente, mientras que los tratamientos sin inoculación o con 0% de fertilización (T3, T1, T6) mostraron alturas significativamente menores (grupos D-E). El testigo absoluto (T0: sin inoculación + 0% (P₂O₅)-(K₂O) registró la menor altura (56 cm) en el grupo E, confirmando que la combinación de CIAT-2 con fertilización completa produce plantas significativamente más altas

Tabla 13

Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de Rhizobium) y Factor B (Niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O), en la variable días a la floración.

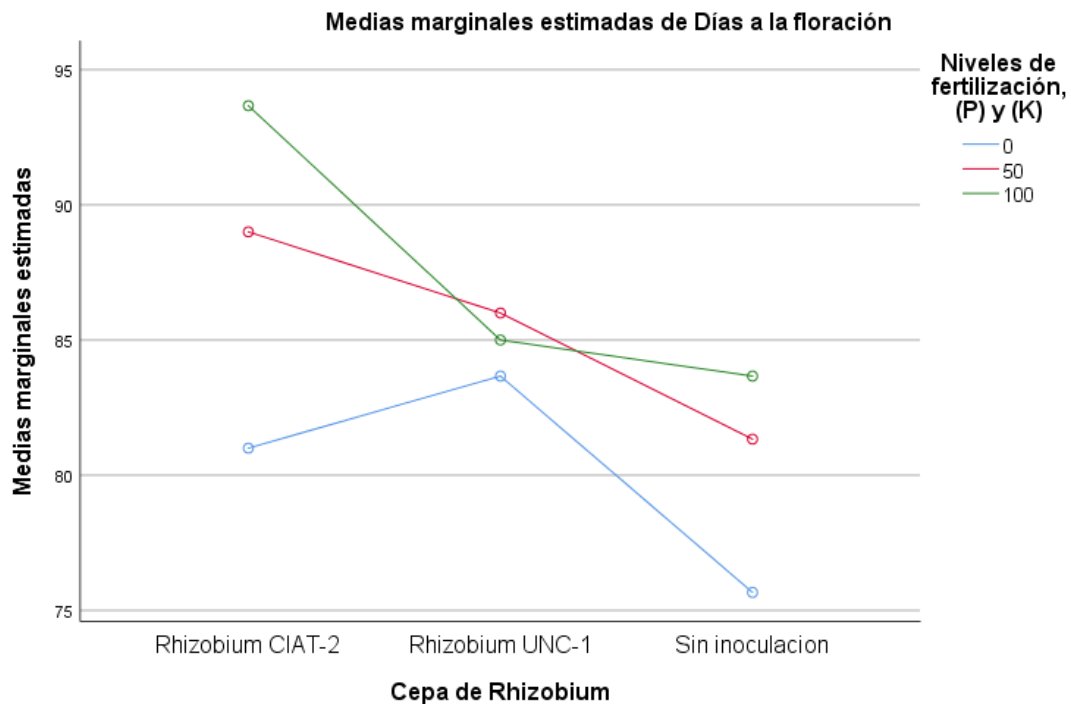
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Cepa de <i>Rhizobium</i>	268.67	2	134.33	45.34	<0.0001
Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	258.67	2	129.33	43.65	<0.0001
Cepa de <i>Rhizobium</i> *Niveles de fertilización (P ₂ O ₅)-(K ₂ O)	97.33	4	24.33	8.21	0.0006
Error	53.33	18	2.96		
Total	678	26			

CV. 2.04

La Tabla 10 análisis revela efectos altamente significativos tanto de la cepa de *Rhizobium* (F=45.34, p<0.0001) como de los niveles de fertilización (P₂O₅)-(K₂O) (F=43.65, p<0.0001) sobre los días a floración. La interacción entre ambos factores también resultó estadísticamente significativa (F=8.21, p=0.0006), demostrando que el efecto de la fertilización en el tiempo de floración varía según la cepa de *Rhizobium* utilizada. El bajo CV de 2.04% indica una variabilidad experimental mínima, lo que confiere una gran confiabilidad a los resultados.

Figura 9

Interacción de medias marginales estimadas para la variable días a la floración.



La Figura 9 muestra una interacción significativa entre los niveles de fertilización (P_2O_5)-(K₂O) y las cepas de *Rhizobium* en los días a la floración, evidenciado por las líneas no paralelas que indican que el efecto de la fertilización depende de la cepa utilizada. La cepa CIAT-2 aumentó progresivamente los días a la floración con mayor fertilización, mientras que la UNC-1 redujo levemente el tiempo al pasar del 50% al 100% de (P_2O_5)-(K₂O), y el tratamiento sin inoculación mostró un incremento moderado pero constante. Estos resultados sugieren que la combinación óptima para modular el tiempo de floración sería UNC-1 con fertilización completa (100% (P_2O_5)-(K₂O)) para acortar el ciclo, o CIAT-2 con alta fertilización si se busca prolongarlo, demostrando que ambos factores deben considerarse conjuntamente para manejar eficientemente el desarrollo fenológico del cultivo.

Tabla 14

Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable días a la floración.

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Tratamientos	645.5	10	64.55	31.63	<0.0001
Bloque	3.93	2	1.96	0.96	0.4058
Error	28.57	14	2.04		
Total	678	26			

CV. 1.69

La Tabla 14 análisis de varianza revela un efecto altamente significativo de los tratamientos ($F=31.63$, $p<0.0001$) sobre el tiempo de floración, demostrando que las distintas combinaciones de cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización modifican sustancialmente este parámetro fenológico. El efecto de bloque no resultó significativo ($F=0.96$, $p=0.4058$), indicando una homogeneidad adecuada en las condiciones experimentales. El excepcional coeficiente de variación ($CV=1.69\%$), notablemente bajo, refleja una precisión experimental extraordinaria y una variabilidad mínima en los datos, lo que confiere una confiabilidad máxima a los resultados.

Tabla 15

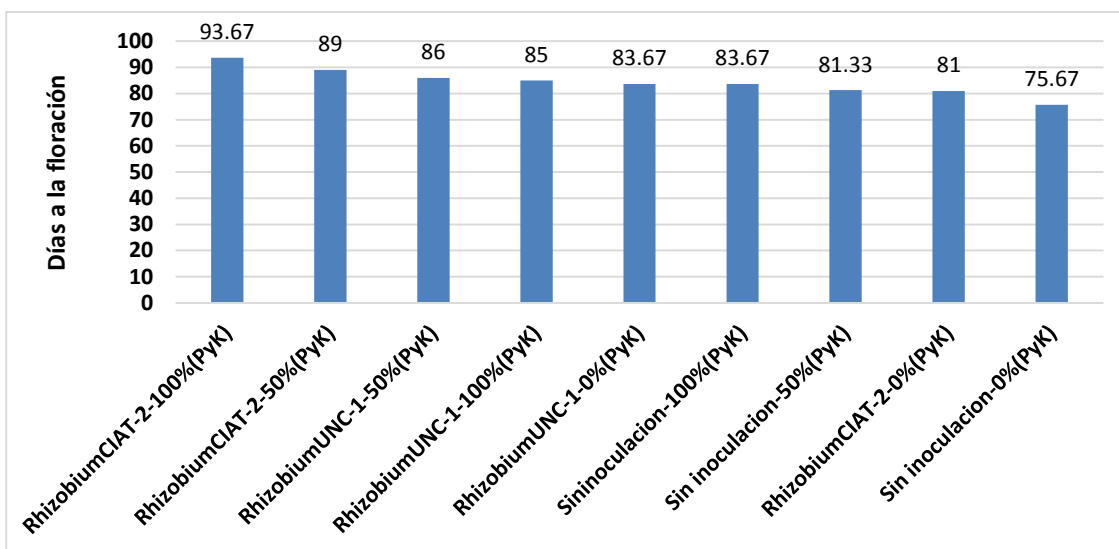
Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable días a la floración.

Clave	tratamientos	Medias			
T8	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	93.67	A		
T7	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	89		B	
T4	<i>Rhizobium</i> UNC-1-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	86		B	C
T5	<i>Rhizobium</i> UNC-1-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	85		B	C D
T3	<i>Rhizobium</i> UNC-1-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	83.67			C D
T2	Sininoculacion-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	83.67			C D
T1	Sin inoculacion-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	81.33			D
T6	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	81			D
T0 - testigo	Sin inoculacion-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	75.67			E

DMS=4.55423

Figura 10

Histograma de los resultados de días de floración, con los tratamientos en estudio.



El análisis de tukey (Tabla 15) e histograma (Figura 10) revela que el tratamiento T8 (*Rhizobium* CIAT-2 + 100% (P_2O_5)-(K₂O)) presentó el mayor retraso en floración (93.67 días), agrupándose en la categoría estadística A, seguido por T7 (CIAT-2 + 50% (P_2O_5)-(K₂O)) con 89 días (grupo B). Los tratamientos con UNC-1 (T4, T5, T3) y sin inoculación (T2, T1) mostraron floración más temprana (81-86 días), agrupados en C-D, mientras que el testigo absoluto (T0) floreció significativamente antes (75.67 días, grupo E). La Diferencia Mínima Significativa de 4.55 días.

Tabla 16

*Análisis de varianza para la interacción del Factor A (Cepa de *Rhizobium*) y Factor B (Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K₂O)), en la variable días a la madurez de cosecha.*

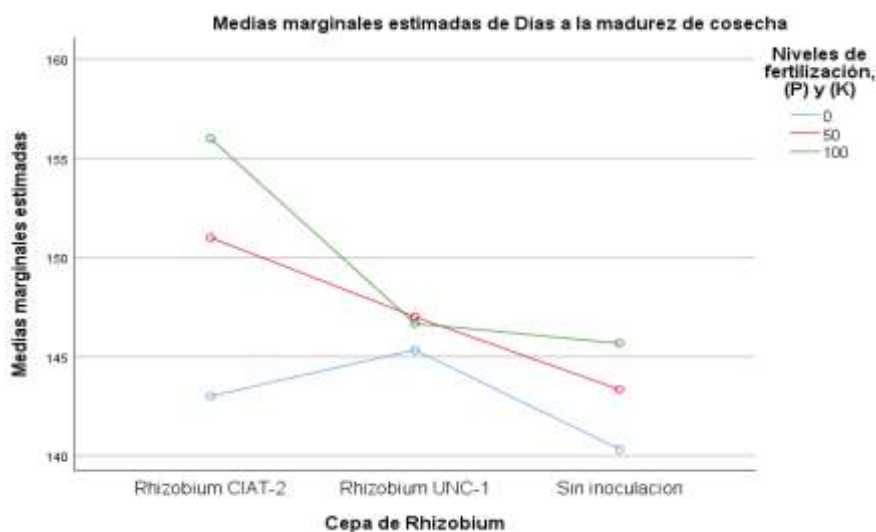
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Cepa de <i>Rhizobium</i>	213.85	2	106.93	82.49	<0.0001
Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)	198.74	2	99.37	76.66	<0.0001
Cepa de <i>Rhizobium</i> *Niveles de fertilización (P_2O_5)-(K ₂ O)	106.81	4	26.7	20.6	<0.0001
Error	23.33	18	1.3		
Total	542.74	26			

CV. 1

El análisis de varianza (Tabla 13) muestra efectos altamente significativos tanto de la cepa de *Rhizobium* ($F=82.49$, $p<0.0001$) como de la fertilización (P_2O_5)-(K₂O) ($F=76.66$, $p<0.0001$) sobre el tiempo de madurez. La interacción significativa ($F=20.6$, $p<0.0001$) revela que el efecto de la fertilización depende críticamente de la cepa utilizada. El CV extremadamente bajo (1%) indica una precisión experimental excepcional, validando plenamente los resultados. Estos hallazgos demuestran que.

Figura 11

Interacción de medias marginales estimadas para la variable días a la madurez de cosecha.



La Figura 11 revela una interacción significativa entre los niveles de fertilización (P_2O_5)-(K₂O) y las cepas de *Rhizobium* en los días requeridos para alcanzar la madurez de cosecha. La cepa CIAT-2 mostró un incremento progresivo en el tiempo de maduración al aumentar la fertilización (de 0% a 100% (P_2O_5)-(K₂O)), mientras que la UNC-1 presentó una ligera reducción al pasar del 50% al 100% de fertilización, y el tratamiento sin inoculación mantuvo un aumento constante pero moderado. Estos resultados indican que la combinación de UNC-1 con fertilización completa (100% (P_2O_5)-(K₂O)) podría acelerar la madurez del cultivo, mientras que CIAT-2 con alta fertilización prolongaría el ciclo, demostrando que la interacción entre ambos factores es clave para optimizar el tiempo de cosecha según los objetivos productivos.

Tabla 17

Análisis de varianza de los tratamientos en estudio para la variable días a la madurez de cosecha.

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	p-valor (significancia)
Tratamientos	524.24	10	52.42	92.85	<0.0001
Bloques	10.6	2	5.3	9.38	0.0026
Error	7.9	14	0.56		
Total	542.74	26			

CV. 1

La Tabla 17 análisis de varianza muestra un efecto extremadamente significativo de los tratamientos ($F=92.85$, $p<0.0001$) sobre el tiempo de madurez, evidenciando que las diferentes combinaciones de cepas de *Rhizobium* y niveles de fertilización afectan drásticamente este parámetro crítico del cultivo. Adicionalmente, se detectó un efecto significativo de bloques ($F=9.38$, $p=0.0026$), lo que sugiere cierta variabilidad controlada en las condiciones experimentales. El coeficiente de variación (CV) de 1% - excepcionalmente bajo - indica una precisión experimental casi perfecta, con una variabilidad mínima que garantiza la máxima confiabilidad de los resultados

Tabla 18

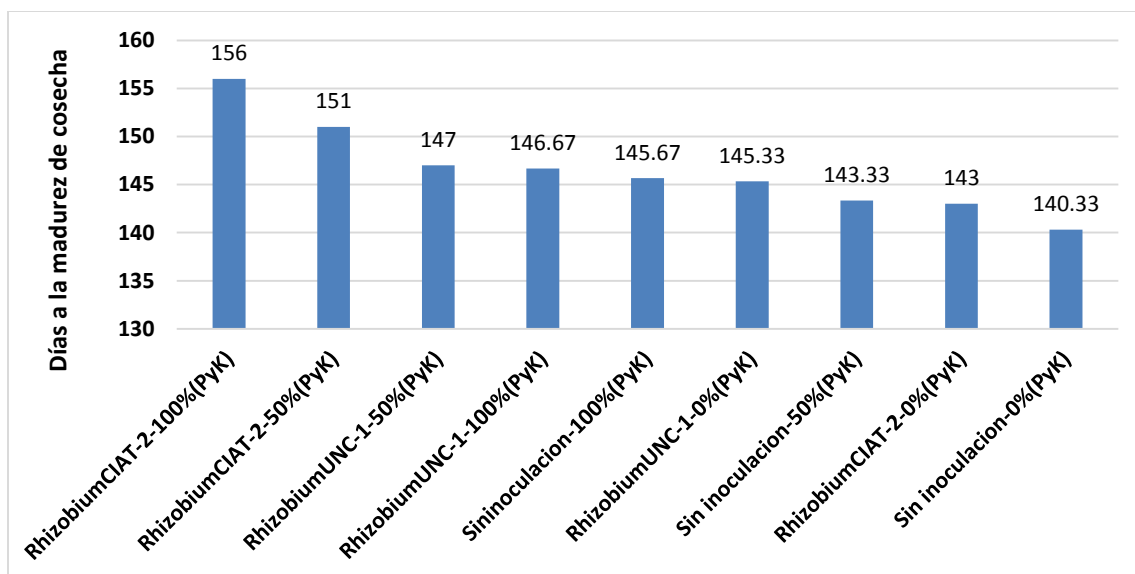
Prueba de comparación múltiple de Tukey al 95 % de confiabilidad para los tratamientos en estudio, para la variable días a la madurez de cosecha.

Clave	Tratamientos	Medias		
T8	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	156	A	
T7	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	151	B	
T4	<i>Rhizobium</i> UNC-1-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	147		C
T5	<i>Rhizobium</i> UNC-1-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	146.67		C
T2	Sininoculacion-100% (P_2O_5)-(K ₂ O)	145.67		C
T3	<i>Rhizobium</i> UNC-1-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	145.33		C D
T1	Sin inoculacion-50% (P_2O_5)-(K ₂ O)	143.33		D E
T6	<i>Rhizobium</i> CIAT-2-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	143		E
T0 - testigo	Sin inoculacion-0% (P_2O_5)-(K ₂ O)	140.33		F

DMS=2.18

Figura 12

Histograma de los resultados de días de madurez de cosecha, con los tratamientos en estudio.



El análisis de Tukey (Tabla 18) e histograma (Figura 12) muestra que el tratamiento T8 (*Rhizobium* CIAT-2 + 100% (P_2O_5)-(K₂O) presentó el mayor tiempo hasta madurez (156 días), ubicándose en el grupo estadístico A, seguido por T7 (CIAT-2 + 50% (P_2O_5)-(K₂O) con 151 días (grupo B). Los tratamientos con UNC-1 (T4, T5, T3) y sin inoculación (T2, T1, T6) mostraron madurez más temprana (143-147.67 días), agrupados en C-E, mientras que el testigo absoluto (T0) alcanzó la madurez significativamente antes (140.33 días, grupo F). La diferencia mínima significativa es de 2.18 días

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- La interacción entre cepas de *Rhizobium spp.* y niveles de fertilización no fue significativa, pero ambos factores de manera individual influyeron altamente en el rendimiento y la nodulación de *Phaseolus vulgaris* nativo.
- La cepa *Rhizobium phaseoli* CIAT-2 fue la más eficiente, logrando 2 172.33 kg ha⁻¹ y 78.35 nódulos por planta al 100 % (P₂O₅)-(K₂O), manteniendo rendimientos elevados incluso bajo fertilización reducida al 50 % (P₂O₅)-(K₂O).
- La cepa *Rhizobium phaseoli* UNC-1 incrementó el rendimiento hasta 1 930.67 kg ha⁻¹ y alcanzó 59.09 nódulos por planta con 100 % (P₂O₅)-(K₂O), evidenciando su capacidad para mejorar la productividad y la fijación de nitrógeno frente al control sin inoculación.
- Los tratamientos sin inoculación presentaron rendimientos menores el máximo 1 730.67 kg ha⁻¹ y escasa nodulación de 26.2 nódulos por planta, confirmando la importancia de la fijación biológica de nitrógeno frente al uso exclusivo de fertilizantes químicos.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento de las cepas de *Rhizobium* en diferentes condiciones edafoclimáticas y variedades locales para ampliar su aplicabilidad en sistemas agrícolas diversos.
- Realizar estudios económicos para analizar la viabilidad financiera de los tratamientos con *Rhizobium spp.* y fertilización química en sistemas agrícolas comerciales.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Agraria De Noticias. (25 de enero de 2024). *Producción de frijol en el Perú*.
<https://agraria.pe/noticias/existen-alrededor-de-74-000-hectareas-de-frijol-en-peru-34552>
- Ayala, A., Acosta, J. A. y Reyes L. (2021). *El cultivo del presente y futuro para frijol México*. Primera edición.
https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_El_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf
- Ayvar, S., Díaz, J., Vargas, M., Mena, A., Tejada, M. y Cuevas, Z. (2020). Rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje de híbridos de maíz, con fertilización biológica y química en trópico seco. *Terra Latinoamericana*, 38 (1), 1-8. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.507>
- Baca, B. E., Soto, L. y Pardo, M. P. (2000). Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos: ciencia y cultura*, 7, 43-49. <https://www.redalyc.org/pdf/294/29403808.pdf>
- Bécquer, C. J. y Prévost, D. (2014). Potencial de formación de nódulos en leguminosas forrajeras y de granos de rizobios, nativos de Sancti Spíritus, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48 (3), 301-307. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193032133017.pdf>
- Bianco, L. (2020). Principales aspectos de la nodulación y fijación biológica de nitrógeno en Fabáceas. *Idesia (Arica)*, 38 (2), 21-29. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000200021>
- 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 fríjol común. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20 (2), 1-14. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1460
- Cantaro, H., Huaranga, A. y Zúñiga, D. (2019). Efectividad simbiótica de dos cepas de *Rhizobium sp.* en cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en Perú. *Idesia (Arica)*, 37 (4), 73-81. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019000400073>
- Cayetano, P., Peña, M., Olivarez, E. y Vargas, S. (2022). *Estudio de Vigilancia Tecnológica en el Cultivo del Frijol*. Instituto Nacional de Innovación Agraria,

- 1-50. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/1685>
- Cuadros Negri, M. (2016) *Evaluación del rendimiento en grano de cinco cultivares de ÑUÑA (Phaseolus vulgaris L.) por efecto de la fijación biológica del nitrógeno en simbiosis con Rhizobium phaseoli* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/4871>
- Cunha, N. M. D. B., Teixeira, I. R., Teixeira, G. C. D. S., Rocha, E. C., Bravo, T. E. P., Souza, A. L. C. D., Damião, E. F., & Sbroggio Filho, A. M. (2025). Physiological Quality of Bean Seeds Cultivated with Rhizobia Reinoculation and Azospirillum Co-Inoculation at Different Growth Stages. *Microorganisms*, 13(4), 805. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040805>
- Díaz Acuña, A. (2022) *Beneficios Ambientales y Económicos de Rhizobium spp., en Relación Simbiótica con Especies Vegetales en Base a su Capacidad de Fijación de Nitrógeno* [Tesis de pregrado, Universidad de Santander]. <https://repositorio.udes.edu.co/bitstreams/e7d0d679-5d99-4a88-b362-7e682c5b3b8f/download>
- Fernández, M. (2020). *Factores determinantes de la nodulación* [Archivo PDF]. https://images.engormix.com/externalFiles/6_factores_determinantes_de_la_nodulacion.pdf
- Fernández, M., De María, N. y De Felipe, M. (2002). Fijación biológica de nitrógeno: factores limitantes. *CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA)*, 1-8. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/128283/1/Fijaci%C3%B3n%20Biol%C3%B3gica391\(MC%20F%20Pascual\).pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/128283/1/Fijaci%C3%B3n%20Biol%C3%B3gica391(MC%20F%20Pascual).pdf)
- Fonseca, D., Vivas, N. y Balaguera, H. (2019). Técnicas aplicadas en la investigación agrícola para cuantificar la fijación de nitrógeno: una revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21 (1), 1-19. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:1342
- González, V. y Pomares, F. (2008). *La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos* [Archivo PDF]. <https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/manuales-tecnicos/manual-fertilizacion-fpomares.pdf>
- Granda, K. I., Alvarado, Y. y Torres, R. (2017). Efecto en campo de la cepa nativa COL6 de *Rhizobium leguminosarum* bv. viciae sobre frijol común cv. Percal en Ecuador. *Revista Centro Agrícola*, 44 (2), 5-13.

<http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v44n2/cag01217.pdf>

- Granda, K., Correa, C., Collahuazo, Y. y Robles, A. (2024). Inoculantes microbianos comerciales con PGPR sobre variables productivas y económicas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 35 (1), 1-15. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/55654/60685>
- Hernández, L. y Salido, Y. (2019): Influencia de la aplicación de Azofert inoculante a base *Rhizobium* en el cultivo del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) VAR. Delicias 364 en finca Juan Sáez. Manatí. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 1-9. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/01/cultivo-frijol-comun.html/hdl.handle.net/20.500.11763/caribe1901cultivo-frijol-comun>
- Hidri, R., Metoui-Ben Mahmoud, O., Debez, A., Abdelly, C., Barea, J.-M., & Azcon, R. (2019). Modulation of C:N:P stoichiometry is involved in the effectiveness of a PGPR and AM fungus in increasing salt stress tolerance of *Sulla carnosa* Tunisian provenances. *Applied Soil Ecology*, 143, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.06.014>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2020). *Manual de Manejo Agronómico de Frijol en Regiones Andinas*. <https://repositorio.inia.gob.pe/>
- Isidra, M. y Valdés, O. (2022). ¿Cómo controlan las leguminosas el número de nódulos para evitar comprometer su crecimiento y desarrollo?. *Revista de Educación Bioquímica*, 41 (2), 51-65. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revedubio/reb-2022/reb222b.pdf>.
- Lépiz, R., López, J. J., González, D. R., Rodríguez, R. y López, E. (2024). Eficiencia en Fijación Biológica de Nitrógeno de Genotipos de Frijol Cultivado y Silvestre. *Tierra Latinoamericana*, 42 (1), 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1082>
- López, J., Lépiz, R., González, R., Rodríguez, R. y López, E. (2020). Eficiencia en fijación biológica de nitrógeno de cepas de *Rhizobium spp.* recolectadas en frijol cultivado y silvestre. *Revista Terra latinoamericana*, 38 (4), 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.654>
- Mariotti, M., Fratini, F., Cerri, D., Andreuccetti, V., Giglio, R., Angeletti, F. G. S., & Turchi, B. (2020). Use of Fresh Scotta Whey as an Additive for Alfalfa Silage. *Agronomy*, 10(3), 365. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030365>
- Medina, P. A. y Prada, M. (2021) *Revisión Sistemática: Tipos de Leguminosas Utilizadas como Fertilizante Nitrogenado para el Suelo Agrícola* [Tesis de pregrado,

- Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84272>
- Mfilinge, A., Mtei, K., & Ndakidemi, P. (2014). Effect of *Rhizobium* Inoculation and Supplementation with Phosphorus and Potassium on Growth and Total Leaf Chlorophyll (Chl) Content of Bush Bean <i>Phaseolus vulgaris</i>, L. *Agricultural Sciences*, 05(14), 1413-1426. <https://doi.org/10.4236/as.2014.514152>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2020). *La zonificación ecológica económica potencial de los suelos*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/43-sector-agrario/suelo>
- Otto, R., Mariano, E., Mulvaney, R. L., Khan, S. A., Boschiero, B. N., Tenelli, S., & Trivelin, P. C. O. (2019). Effect of previous soil management on sugarcane response to nitrogen fertilization. *Scientia Agricola*, 76(1), 72-81. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0147>
- Paredes, M. C. (2013) *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica Argentina]. <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/393/1/doc.pdf>
- Rodríguez, J. y Ruiz, W. (2022) *Efecto de la inoculación de cepas de Rhizobium eficientes en la fijación biológica de nitrógeno sobre los parámetros de rendimiento de Phaseolus vulgaris “frejol comun” var. panamito bajo condiciones de campo en el sector Aucasoma*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Tarapoto]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/4967/1/Jean%20Claude%20Rodríguez%20Peralta%20-%20Tesis.pdf>
- Santoyo, G., Hernández, J., Márquez, L., De Luna, G. y Sánchez, J. (2021). *Rhizobium phaseoli* tolerante a un insecticida en el crecimiento de *Phaseolus vulgaris*. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 12 (1), 30-37. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942021000100004&lng=es&tlng=es
- Sevilla, A. Y. (2023) *Efecto de la fertilización edáfica combinada con NPK y complementada con abono foliar para el incremento del rendimiento en el cultivo de frejol (Phaseolus vulgaris L.)* [Tesis de pregrado, Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SEVILLA%20LOPEZ%20ANGEL%20Y%20ORIKY.pdf>
- Shener, C. (2021) *Inoculación con Rhizobium phaseoli en tres genotipos de Phaseolus*

- vulgaris l. bajo dos densidades de población* [Tesis de posgrado, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/21834/1/1080315077.pdf>
- Sorel, W. (2014) *Adaptación y comparativo de rendimiento de dos cultivares de fríjol (Phaseolus vulgaris l.) tipo caballero con tres densidades de siembra* [Tesis de Pregrado, Universidad del Centro del Perú]. <https://docplayer.es/90964179-Universidad-nacional-del-centro-del-peru.html>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2021). *Las leguminosas beneficios de consumirlas*. <https://www.personal.unam.mx/Docs/Cendi/leguminosas.pdf>
- Universidad Nacional de la Plata. (2015). *Fertilidad química*. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/75204/mod_resource/content/1/UDD%20D8.1%20Fertilidad%20Qu%C3%ADmica%20.pdf
- Young, W., Moeskjaer, S., Afonin, A., Rahi, P., Maluk, M., James, K., Cavassim, A., Rashid, O., Aserse, A., Perry, J., Wang, T., Velázquez, E., Andronov, E., Tampakaki, A., Félix, F., González, R., Youseif, H., Lepetit, M., Boivin, S. y Tian, F. (2021). Definición del complejo de especies de *Rhizobium leguminosarum*. *Genes*, 12 (1), 1–26. <https://doi.org/10.3390/genes12010111>

ANEXOS

Tabla 19

Test de supuestos de normalidad.

Variables	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
NÚMERO DE NODULOS	0.944	27	0.153
RENDIMIENTO Kg ha-1	0.945	27	0.159
ALTURA DE PLANTA	0.956	27	0.306
DÍAS DESPUES DE FLORACIÓN	0.966	27	0.499
DÍAS DESPUES DE DE MADUREZ COSECHA	0.930	27	0.068

Tabla 20

Test de supuestos de homogeneidad de varianza para altura de planta

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
ALTURA DE PLANTA	Se basa en la media	2.018	2	24	0.155

Tabla 21

Test de supuestos de homogeneidad de varianza para rendimiento

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
RENDIMIENTO Kg ha-1	Se basa en la media	1.920	8	18	0.119

Tabla 22

Test de supuestos de homogeneidad de varianza para días a la floración

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
DÍAS A LA FLORACIÓN	Se basa en la media	0.994	2	24	0.385

Tabla 23

Test de supuestos de homogeneidad de varianza para rendimiento días a la madurez de cosecha

		Estadístico			
		de Levene	gl1	gl2	Sig.
DÍAS A LA	Se basa en	4.861	2	24	0.017
MADUREZ	la media				
COSECHA					

Figura 13 Análisis de suelo



INIA
Instituto Nacional de Innovación Agraria

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200**



INACAL
Instituto Nacional de Acreditación y Certificación

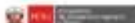
INFORME DE ENSAYO
N° 080906-24 / SU / LABSAF - BAÑOS DEL INCA

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente Propietario / Productor Dirección del cliente Solicitado por Muestrado por Número de muestra(s) Producto declarado Presentación de las muestra(s) Referencia del muestreo Procedencia de muestra(s) Fecha(s) de muestreo Fecha de recepción de muestra(s) Lugar de ensayo Fecha(s) de análisis Cotización del servicio Fecha de emisión	INIA PI SUELOS INVESTIGACION AV LA MOLINA N°1381 - LIMA CLIENTE CLIENTE 3 Suelo BOLSA DE PLÁSTICO RESERVADO POR EL CLIENTE CAJAMAMBA (ANEXO PAMPA GRANDE)-CAJAMAMBA - CAJAMARCA 2023-09-03 2023-09-27 LABSAF BAÑOS DEL INCA Del 2024-06-28 al 2024-08-13 269-24-81 2024-08-15
--	--

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	3				
Código de Laboratorio	SU1729-B1-24	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	-	-	-	-
Fecha de Muestreo	2023-09-03	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (**)	16:00	-	-	-	-
Condición de la muestra	Conservada	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	P-F-24	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC			
pH	unad pH	6.8	-	-	-
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	0.50	-	-	-
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0.50	-	-	-
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0.50	0.8	-	-
Materia Orgánica	%	0.10	3.4	-	-
Fósforo Disponible	mg/kg	0.50	3.4	-	-
Conductividad Eléctrica	mS/cm	5.00	19.1	-	-
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg g-1	0.10	1.5	-	-
Potasio disponible (°)	mg kg-1	0.50	598.9	-	-
Aluminio (Al) (°)	mg kg-1	0.05	10.431,44	-	-
Asenio (As) (°)	mg kg-1	0.05	2.00	-	-
Bario (Ba) (°)	mg kg-1	0.05	76.40	-	-
Calcio (Ca) (°)	mg kg-1	0.05	3 150.60	-	-
Cadmio (Cd) (°)	mg kg-1	0.05	8.49	-	-
Cobalto (Co) (°)	mg kg-1	0.05	35.47	-	-
Cromo (Cr) (°)	mg kg-1	0.05	16.96	-	-
Cobre (Cu) (°)	mg kg-1	0.05	13.96	-	-
Hierro (Fe) (°)	mg kg-1	0.05	18.025,55	-	-
Fósforo (P) (°)	mg kg-1	0.05	2 576.10	-	-
Potasio (K) (°)	mg kg-1	0.05	443.61	-	-
Magnesio (Mg) (°)	mg kg-1	0.05	503.35	-	-
Manganeso (Mn) (°)	mg kg-1	0.05	150.63	-	-
Mercurio (Hg) (°)	mg kg-1	0.05	< 0.05	-	-
Sodio (Na) (°)	mg kg-1	0.05	261.14	-	-
Níquel (Ni) (°)	mg kg-1	0.05	14.48	-	-
Plomo (Pb) (°)	mg kg-1	0.05	36.46	-	-
Estroncio (Sr) (°)	mg kg-1	0.05	22.97	-	-
Zinc (Zn) (°)	mg kg-1	0.05	30.96	-	-




Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Fitos
Acreditado con la Norma
ISO-15020:2017
LABSAF (Nombre)
 Dirección: (Dirección del laboratorio)
 Email: (correo de contacto del laboratorio)



Trasado digitalmente por:
 CHARLES CARRERA ALVARADO
 P.º 01000011
 MÓVIL: 999 999 999
 FIRMADO
 Fecha: 15/08/2024 11:08:00

P.48 / Ver 08

Página 1 de 1

Figura 14

Delimitación del área



Figura 15

Recolección de la muestra de suelo



Figura 16

Encalado del área



Figura 17

Preparación del terreno



Figura 18

Delimitación de las unidades experimentales



Figura 19

Área apropiada para la instalación del trabajo de investigación



Figura 20

Inoculación de semilla



Figura 21

Siembra de frijol nativo



Figura 22

Evaluación de emergencia



Figura 23

Primera fertilización



Figura 24

Riego por inundación



Figura 25

Tutorado de Phaseolus vulgaris



Figura 26

Control fitosanitario



Figura 27

Evaluación del botón floral



Figura 28

Evaluación de floración



Figura 29

Extracción de nódulos



Figura 30

Lavado de nódulos



Figura 31

Conteo de nódulos



Figura 32

Limpieza de malezas



Figura 33

Identificación de tratamientos



Figura 34

Evaluación de madurez fisiológica



Figura 35

Evaluación de madurez de cosecha



Figura 36

Cosecha



Figura 37

Pesado de grano



Figura 38

Muestras para ingresar al laboratorio



Figura 39

Foto representativa del trabajo de investigación

