

Rol de *Bacillus subtilis* y dosis de fósforo en la concentración, distribución y absorción de macronutrientes en frijol común

Role of *Bacillus subtilis* and phosphorus doses on macronutrient concentration, partitioning and uptake of common bean

Jesús del Rosario Ruelas-Islas¹ , Luis A. Peinado-Fuentes², Celia S. Romero-Félix¹ ,
Cándido Mendoza-Pérez³ , Hernán Celaya-Michel⁴ , Pablo Preciado-Rangel⁵ ,
Quintín A. Ayala-Armenta¹  y Fidel Núñez-Ramírez^{6†} 

¹ Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte-UAS. Calle 16 y Av. Japaraquí, Juan José Ríos. 81110, Ahome, Sinaloa, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera Internacional México-Nogales, km 1609, Juan José Ríos. 81110 Guasave, Sinaloa, México.

³ Colegio de Postgraduados, Departamento de Hidrociencias. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

⁴ Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. Carretera 100 a Bahía de Kino km 21.5, La Manga. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana. 27170, Torreón, Coahuila, México.

⁶ Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, ejido Nuevo León. 21705 Mexicali, Baja California, México.

† Autor para correspondencia (fidel.nunez@uabc.edu.mx)

Editor de Sección: Dra. Evangelina E. Quiñones Aguilar

RESUMEN

El conocimiento sobre la absorción y distribución de macronutrientes es indispensable en los programas de fertilización en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Al respecto, el empleo de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) en combinación con la fertilización fosfatada, podrían ejercer un efecto sinérgico y potencializar la absorción y distribución de nutrientes en este cultivo. Se estableció un experimento con el propósito de investigar la respuesta del cultivo de frijol a cuatro dosis de fósforo (P), (0, 25, 50, 100 kg ha⁻¹ P₂O₅) y a la cepa *Bacillus subtilis* Q11 (Bs) (inoculación a la semilla y un testigo sin inocular) en la concentración, distribución y acumulación de macronutrientes. El experimento se estableció bajo un diseño de parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones. Según los resultados obtenidos, la acumulación de biomasa se afectó de forma individual por el P y Bs. La mayor acumulación de biomasa se obtuvo con dosis de P mayores a los 50 kg ha⁻¹, mientras que la inoculación con Bs produjo mayor biomasa que el testigo. La interacción P × Bs afectó la concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en los órganos de la planta en todas las etapas fenológicas, excepto en la vaina durante la etapa de llenado de grano. La acumulación de nutrientes presentó un patrón característico sigmoidal y se modificó individualmente por el P y la inoculación con Bs. La dosis de 50 kg ha⁻¹ de P incrementó la acumulación de macronutrientes, sobre todo en la etapa de llenado de grano, mientras que el uso de Bs incrementó la absorción en las etapas de llenado de grano y madurez fisiológica. En conclusión, se comprobó la utilidad de la combinación de Bs con P en la modificación de la concentración, absorción y acumulación de nutrientes en frijol.

Palabras clave: biomasa, crecimiento, fenología, órganos reproductivos, órganos vegetativos.

SUMMARY

Knowledge on macronutrient uptake and distribution is highly relevant in fertilization management programs of common bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.). In this regard, the use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in combination with phosphorus fertilization could exert a synergistic effect and potentiate the



Cita recomendada:

Ruelas-Islas, J. R., Peinado-Fuentes, L. A., Romero-Félix, C. S., Mendoza-Pérez, C., Celaya-Michel, H., Preciado-Rangel, P., ... Núñez-Ramírez, F. (2023). Rol de *Bacillus subtilis* y dosis de fósforo en concentración, distribución y absorción de macronutrientes en frijol común. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-18. e1056. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1056>

Recibido: 27 de septiembre de 2021.

Aceptado: 30 de enero de 2023.

Artículo. Volumen 41.

Abril de 2023.

process of uptake and distribution of nutrients on this crop. A field experiment was established to investigate the response of the common bean crop to four phosphorus (P) doses, (0, 25, 50, 100 kg ha⁻¹ P₂O₅) and the strain *Bacillus subtilis* Q11 (Bs) (seed inoculation and a control without inoculation) on macronutrient concentration, distribution and accumulation. The experiment was arranged under a split plot in a randomized complete block design with three replicates. According to our results, the P doses and the inoculation process affected biomass accumulation individually. The highest biomass accumulation was obtained with P doses >50 kg ha⁻¹; whereas inoculation with Bs produced higher biomass compared to the control. The interaction P × Bs affected significantly the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium in different plant organs in all stages of growth, except for pods during the grain filling stage. The nutrient uptake pattern exhibited a sigmoid curve and was individually modified by the P doses and Bs inoculation. The 50 kg ha⁻¹ P dose increased macronutrient accumulation, especially during grain filling; while the inoculation with Bs enhanced the uptake process during grain filling and physiological maturity stages. In conclusion, combining Bs and P doses inflicts positive effects over the modification of concentration, uptake and macronutrient accumulation in common bean crop.

Index words: biomass, growth, phenology, reproductive organs, vegetative organs.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) representa una de las principales fuentes de calorías y proteínas consumida a nivel mundial (Terán, Lema, Webster y Singh, 2009). La producción de este cultivo en Sinaloa, México, es de gran importancia debido a la superficie sembrada; tan solo en el ciclo agrícola otoño-invierno 2020 se establecieron aproximadamente 82 323 hectáreas y se obtuvo una producción total de 139 233 toneladas, para dar con un rendimiento de 1.7 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2020). En este contexto, factores como el cambio climático (Kanyenga, Kasongo, Kizungu, Nachigera y Kalonji, 2016), déficit hídrico (Emam, Shekoofa, Salehi y Jalali, 2010), problemas de suelo, así como prácticas inadecuadas de manejo agronómico son las que limitan la productividad de este cultivo (Rodríguez y Creamer, 2014).

En regiones del noroeste de México, la mayoría de los suelos son de reacción alcalina y pobres en materia orgánica (INEGI, 2019). En este sentido, la baja disponibilidad de nutrientes como el fósforo (P) ha sido uno de los principales factores que limitan el crecimiento vegetativo y radicular de diferentes cultivos (Kochian, 2012). Algunos autores mencionan que una mejora en la fertilización con P se puede lograr mediante el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), lo que a su vez incrementa la productividad y la fertilidad del suelo (García y Delgado, 2016; Heppell *et al.*, 2016; Whitters, Sylvester, Jones, Healey y Talboys, 2014). Dichos microorganismos modifican el crecimiento vegetal a través de mecanismos como la fijación de nitrógeno (N), acidificación del medio y la producción de reguladores de crecimiento (Simpson *et al.*, 2011). Lo anterior, se traduce en un incremento en la absorción de agua y nutrientes (Kochian, 2012).

De la gran cantidad de PGPR, *Bacillus subtilis* representa una opción importante de considerar en la producción de cultivos. Lo anterior es debido a que solubiliza el P fijado en suelos alcalinos ricos en compuestos cálcicos (Swain, Laxminarayana y Ray, 2012; Cisneros, Sánchez y Menjivar, 2017), es muy termo-tolerante (Swain *et al.*, 2012; Sakil-Munna, Tahera, Mohibul-Hassan, Nur y Noor, 2015), promueve la producción de reguladores de crecimiento, el crecimiento y la absorción de nutrientes (Prakash y Arora, 2019). *Bacillus subtilis* constituye incluso una oportunidad de biofortificar algunos granos de interés alimenticio para el ser humano (Zaidi, Usmani, Singh y Musarrat, 2006).

El cultivo de frijol tiene un ciclo productivo corto lo cual permite un estudio detallado de patrón de absorción de nutrientes. Resultados previos indican que, al inicio de la estación de crecimiento, el cultivo tiene una etapa de lenta acumulación nutrimental, seguida por una etapa de acumulación intensa y finalmente una etapa de declinación (Lima, Nascimento y Junior, 2016). Bertsch-Hernández (2004) menciona la importancia de identificar correctamente los patrones de absorción nutrimental del cultivo en etapas fenológicas debido a que con ello se pueden desarrollar prácticas de manejo que incrementen la absorción, acumulación de minerales en tejidos y eficiencia en la absorción de estos evitando con ello un evento de estrés nutrimental durante el ciclo de crecimiento.

En el noreste de México específicamente en el estado de Sinaloa, es limitada la información acerca de la concentración, distribución y acumulación nutrimental en el cultivo de frijol que pueda ayudar a mejorar sus prácticas de fertilización. En esta región los productores fertilizan únicamente con N sin considerar los requerimientos del resto de los nutrientes del cultivo. Lo anterior genera una ineficiencia en la absorción de los fertilizantes especialmente cuando se utilizan fuentes poco solubles y métodos de aplicación inapropiados. De acuerdo con Peres-Sorato, Mazzetti, Andriani y Gomes (2013), la concentración y la absorción de nutrientes en frijol varía dependiendo de la fertilidad del suelo y la dosis de fertilizantes aplicados. Por consiguiente, el objetivo de este estudio consistió en evaluar el efecto del P y la inoculación de la semilla con *Bacillus subtilis* (Bs) en la concentración, distribución y acumulación de macronutrientes en el cultivo de frijol para las condiciones agroclimáticas del noroeste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Experimento

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2017 en la unidad experimental de la Empresa Química Internacional Aplicada S.A de C.V. El suelo empleado presentó textura franco-arcillosa (32% de arcilla, 36% de limo y 32% de arena), bajo en materia orgánica (< 1.0%) y densidad aparente de 1.15 g cm⁻³, con una salinidad baja (0.69 dS m⁻¹), y un pH alcalino (7.6). Las concentraciones de macronutrientes fueron 145, 32, 760, 3950 y 590 mg kg⁻¹, para N, P (Olsen), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), respectivamente. Las técnicas de siembra para producción que se emplearon de este cultivo, fueron las recomendadas por Salinas-Pérez et al. (2012).

Diseño Experimental

Se levantaron camas de siembra separadas a 0.80 m. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño de parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones. La parcela principal constó de cuatro dosis de P (0, 25, 50 y 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y la sub-parcela consistió en la inoculación o no de la semilla con *Bacillus subtilis* Q11[®] (Bs). Para el proceso de inoculación con Bs, se utilizaron 5.0 mL de solución preparada a una concentración de 2×10⁸ UFC mL⁻¹ por cada kilogramo de semilla (Quimia, Ahome, México). La parcela fue de 64.0 m² y constó de ocho camas de siembra orientadas de norte a sur, separadas a 0.80 m con una longitud de 10.0 m. A su vez, la parcela se dividió a la mitad y cada mitad constituyó la subparcela (32 m²).

Se utilizó semilla de frijol variedad Azufrado Higuera a una densidad de 180 000 plantas ha⁻¹. La siembra se realizó en suelo húmedo. Además del P, se aplicaron 150 kg ha⁻¹ de N al momento de la siembra. Para la programación del riego se utilizó la plataforma IRRIMODEL (Sifuentes, Quintana, Macías y González, 2012), la cual estima la variación de la humedad del suelo en la zona radicular de acuerdo con la

metodología propuesta por Ojeda, Sifuentes, Slack y Carrillo (2004). Adicionalmente, se estableció un criterio de riego del 50% de la humedad aprovechable y se verificó el contenido de humedad usando TDR (Time Domain Reflectometry¹). El control de plagas fue exitoso siguiendo las recomendaciones de la guía de asistencia técnica agrícola para el área de influencia del campo en Sinaloa (Apodaca-Sánchez, 2016¹).

Muestreo y Extracción de Macronutrientes

Para estimar la concentración total y absorción mineral del cultivo, se realizaron muestreos destructivos de tejido vegetal de los diferentes órganos de la planta (hojas, tallos, vainas) en cuatro etapas fenológicas: a) tercera hoja trifoliada (25 días después de la siembra [dds]), b) floración (45 dds), c) llenado de grano (75 dds) y d) madurez fisiológica (105 dds). Se cosecharon las plantas ubicadas sobre un metro lineal del surco central de cada sub-parcela. El material vegetal fue lavado y sumergido en solución ácida realizada con agua destilada y ácido sulfúrico (50:50) para posteriormente ser sometidas a secado (70 °C) en horno por 72 h. Una vez que se obtuvo peso constante de las muestras, se molieron para analizar en laboratorio la concentración de nutrientes.

Las variables evaluadas fueron la biomasa acumulada, la concentración macronutrientes contenidas en cada muestreo, así como la acumulación de los mismos durante la estación de crecimiento. El N total fue estimado por digestión Kjeldhal (Bradstreet, 1965; Moréis, 1983). El contenido de P total se estimó por digestión húmeda con ácido nítrico (HNO₃) y ácido perclórico (HClO₄) (Mengel y Kirby, 2000). Los materiales filtrados obtenidos mediante la digestión húmeda para fósforo, fueron utilizados para la determinación de potasio. Se utilizó el método de emisión de llama-flamometría, mientras que para la determinación de calcio (Ca) y magnesio (Mg) se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica. La cantidad de cada nutriente absorbido y distribuido dentro de los órganos de la planta fue estimado al multiplicar el peso seco por la concentración de cada macronutriente.

Análisis Estadístico

Los resultados de rendimiento y crecimiento del cultivo de frijol han sido presentados en un documento publicado previamente (Ruelas-Islas, Reyes, Núñez, Flores y Villarreal, 2018). Los datos obtenidos de la concentración y absorción mineral fueron sujetos a análisis de varianza considerando cada etapa fenológica. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($P = 0.05$) (Wong-González, 2010). Los valores de absorción se graficaron *versus* tiempo, se realizaron modelos de regresión polinomial para generar las curvas de absorción nutrimental. En todas las determinaciones estadísticas se utilizó al paquete estadístico Minitab (2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acumulación de Biomasa

No se identificó interacción entre la aplicación de P y la inoculación con Bs ($P \times B_s$; $P > 0.05$) en la producción de biomasa en ninguna de las etapas fenológicas del cultivo (Cuadro 1). La acumulación de biomasa en las etapas de 3ra hoja trifoliada y floración no se afectó por los tratamientos evaluados. Al llegar al llenado de grano, la biomasa se incrementó significativamente al aplicar 50 y 100 kg ha⁻¹ de P con respecto a 0 o 25 kg ha⁻¹ de P ($P < 0.006$). En madurez fisiológica, la mayor acumulación de biomasa seca se obtuvo al aplicar 50 kg ha⁻¹ de P y la menor fue con 0 kg ha⁻¹ de P. Las dosis

¹Apodaca-Sánchez, M. Á. (2016). Principales enfermedades infecciosas del frijol en Sinaloa y su manejo. En *Memoria Jornada de transferencia de tecnología del cultivo del frijol* (pp.7-26). Sinaloa, México: SAGARPA-FUNDACIÓN PRODUCE-GOBIERNO DEL ESTADO DE SINALOA.

**Cuadro 1. Acumulación de biomasa seca en el cultivo de frijol (kg ha^{-1}) por efecto de la aplicación de fósforo y *Bacillus subtilis*.
Table 1. Dry biomass accumulation in common bean (kg ha^{-1}) as a function of phosphorus doses and *Bacillus subtilis*.**

Fósforo (P)	3ra hoja trifoliada	Floración	Llenado de grano	Madurez fisiológica
0 kg ha^{-1} P_2O_5	352 (± 47) [†]	1054 (± 198)	5089 (± 134)b [†]	4494 (± 102)c
25 kg ha^{-1} P_2O_5	360 (± 52)	1288 (± 101)	5729 (± 127)b	5611 (± 135)ab
50 kg ha^{-1} P_2O_5	413 (± 68)	1310 (± 127)	6497 (± 101)a	6341 (± 142)a
100 kg ha^{-1} P_2O_5	397 (± 62)	1382 (± 105)	6331 (± 121)a	5547 (± 105)b
Probabilidad	0.645	0.443	0.006	0.007
<i>B. subtilis</i> (Bs)				
Inoculación	373 (± 36)	1319 (± 149)	6232.8 (± 147)a	6143.0 (± 142)a
Control	388 (± 44)	1153 (± 136)	5589.8 (± 134)b	4854.0 (± 167)b
Probabilidad	0.675	0.219	0.024	0.001
Interacción P $\times$ Bs				
Probabilidad	0.426	0.827	0.335	0.268

[†] Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Desviación estándar.

[†] Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Standard deviation.

de 100 kg ha^{-1} de P redujeron significativamente dicha acumulación ($P < 0.007$). Por otra parte, en la etapa de llenado grano y madurez fisiológica, el cultivo respondió favorablemente a la inoculación Bs a la semilla ($P < 0.024$), (Cuadro 1).

Concentración de N

La concentración de N y su distribución en los diferentes órganos de la planta y en las diferentes etapas fenológicas fue afectada por la interacción de los dos factores evaluados ($P \times \text{Bs}$; $P < 0.010$) (Cuadro 2), excepto en las vainas durante la etapa del llenado de grano y madurez fisiológica ($P > 0.05$). La combinación de 100 kg ha^{-1} de P e inoculación con Bs indujeron favorablemente a una mayor concentración de N en las hojas en etapa de tercera hoja trifoliada y floración. Al llegar el cultivo a etapa de llenado de grano, las dosis de P por encima de los 50 kg ha^{-1} , más la inoculación con Bs incrementaron la concentración de N en las hojas. La dosis de 50 kg ha^{-1} de P y la combinación de 100 kg ha^{-1} de P, más la inoculación con Bs mostraron las mayores concentraciones de N en madurez fisiológica. Se observó que la menor concentración de N en hojas resultó en los tratamientos sin P y sin inoculación con Bs.

La mayor concentración de N en tallos se encontró en los tratamientos con dosis mayores a los 50 kg ha^{-1} de P más inoculación con Bs en la etapa de tercera hoja trifoliada. En el resto de las etapas fenológicas, la mayor concentración de N se encontró con la aplicación de 50 kg ha^{-1} de P más la inoculación con Bs. Por otro lado, la mayor concentración de N en las vainas fue afectada por la dosis de P ($P < 0.015$) encontrando las mayores concentraciones en las dosis de 50 y 100 kg ha^{-1} de P. De manera general, las mayores concentraciones de N se encontraron en las hojas, seguida por los tallos y finalmente por las vainas (Cuadro 2).

Concentración de P

La concentración de P en las hojas y tallos en las diferentes etapas fenológicas fue afectada significativamente por la interacción de los factores evaluados ($P \times \text{Bs}$; $P < 0.04$), (Cuadro 3). La combinación de las dosis de 50 o 100 kg ha^{-1} de

Cuadro 2. Concentración de N en órganos vegetativos y reproductivos del cultivo de frijol en diferentes etapas fenológicas.
Table 2. Nitrogen concentration on vegetative and reproductive organs in common bean at different phenological stages.

Fósforo (P)	Tercera hoja trifoliada		Floración		Llenado de grano			Madurez fisiológica		
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Vainas	Hojas	Tallos	Vainas
	Concentración (%)									
0 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.75 (±0.27) ^{b†}	2.09 (±0.21) ^b	3.18 (±0.75)	3.07 (±0.09) ^b	3.07 (±0.50) ^b	2.99 (±0.75) ^b	2.48 (±0.27) ^b	2.60 (±0.18) ^b	2.90 (±0.39) ^b	2.52 (±0.15) ^b
25 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	3.15 (±0.71) ^{ab}	2.53 (±0.29) ^{ab}	3.73 (±0.55)	3.38 (±0.39) ^{ab}	2.83 (±0.28) ^b	3.40 (±0.32) ^{ab}	2.67 (±0.36) ^a	2.72 (±0.25) ^b	3.10 (±0.57) ^b	2.69 (±0.13) ^a
50 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	3.88 (±0.42) ^a	2.89 (±0.81) ^a	4.21 (±0.85)	3.99 (±0.02) ^a	3.96 (±0.92) ^a	3.83 (±0.79) ^a	2.69 (±0.43) ^a	3.36 (±0.17) ^a	4.18 (±1.37) ^a	2.73 (±0.14) ^a
100 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	4.05 (±0.60) ^a	2.57 (±0.72) ^{ab}	4.51 (±1.30)	3.15 (±0.13) ^b	4.01 (±0.97) ^a	2.73 (±0.48) ^b	2.26 (±0.67) ^b	3.25 (±0.32) ^a	3.74 (±0.54) ^{ab}	2.27 (±0.12) ^b
Probabilidad	0.001	0.002	0.093	0.039	0.020	<0.001	0.015	<0.001	0.050	0.011
B. subtilis (Bs)										
Inoculación	3.91 (±3.00) ^a	2.92 (±0.56) ^a	4.68 (±0.76) ^a	3.70 (±0.78) ^a	4.06 (±0.85) ^a	3.75 (±0.54) ^a	2.62 (±0.47)	3.09 (±0.33)	4.10 (±0.90) ^a	2.65 (±0.48)
Control	3.00 (±3.91) ^b	2.11 (±0.32) ^b	3.13 (±0.41) ^b	3.09 (±0.14) ^b	2.88 (±0.27) ^b	2.73 (±0.46) ^b	2.43 (±0.43)	2.88 (±0.45)	2.86 (±0.32) ^b	2.54 (±0.33)
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	0.066	0.206	<0.001	0.061
Interacción P × Bs										
0 + Inoculación	3.00 (±0.00) ^e	2.25 (±0.16) ^{bc}	3.86 (±0.15) ^c	3.10 (±0.11) ^c	3.51 (±0.22) ^b	3.66 (±0.15) ^b	2.35 (±0.19)	2.71 (±0.22) ^{cd}	3.20 (±0.30) ^d	2.34 (±0.77)
0 + Control	2.50 (±0.00) ^f	1.92 (±0.28) ^c	2.50 (±0.00) ^e	3.04 (±0.06) ^c	2.63 (±0.11) ^d	2.32 (±0.24) ^d	2.61 (±0.09)	2.50 (±0.00) ^d	2.61 (±0.22) ^e	2.62 (±0.84)
25 + Inoculación	3.80 (±0.00) ^c	2.70 (±0.26) ^b	4.20 (±0.30) ^c	3.70 (±0.20) ^b	3.04 (±0.26) ^c	3.66 (±0.15) ^b	2.74 (±0.16)	2.94 (±0.12) ^{bc}	3.40 (±0.20) ^c	2.75 (±0.91)
25 + Control	2.50 (±0.00) ^f	2.36 (±0.35) ^{bc}	3.26 (±0.15) ^d	3.06 (±0.22) ^c	2.63 (±0.11) ^d	3.14 (±0.17) ^c	2.61 (±0.23)	2.50 (±0.00) ^d	2.61 (±0.22) ^e	2.63 (±0.84)
50 + Inoculación	4.26 (±0.05) ^b	3.55 (±0.08) ^a	4.96 (±0.28) ^b	4.90 (±0.40) ^a	4.80 (±0.20) ^a	4.53 (±0.30) ^a	2.93 (±0.73)	3.23 (±0.15) ^{ab}	5.43 (±0.23) ^a	2.90 (±0.53)
50 + Control	3.50 (±0.00) ^d	2.24 (±0.16) ^{bc}	3.45 (±0.12) ^{cd}	3.08 (±0.10) ^c	3.13 (±0.11) ^c	3.14 (±0.16) ^c	2.46 (±0.09)	3.50 (±0.00) ^a	2.94 (±0.12) ^{de}	2.45 (±0.54)
100 + Inoculación	4.60 (±0.10) ^a	3.21 (±0.25) ^{ab}	5.70 (±0.20) ^a	3.11 (±0.12) ^c	4.90 (±0.10) ^a	3.14 (±0.17) ^c	2.46 (±0.59)	3.48 (±0.13) ^a	4.20 (±0.30) ^b	2.46 (±0.61)
100 + Control	3.50 (±0.00) ^d	1.94 (±0.49) ^c	3.33 (±0.20) ^d	3.19 (±0.16) ^c	3.13 (±0.11) ^c	2.32 (±0.24) ^d	2.07 (±0.56)	3.02 (±0.29) ^{bc}	3.28 (±0.15) ^{cd}	2.01 (±0.47)
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	0.052	<0.001	<0.001	0.052

[†] Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Desviación estándar.

[†] Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Standard deviation.

P más inoculación con Bs resultó con la mayor concentración de P en las hojas en las etapas de tercera hoja trifoliada y llenado de grano; mientras que la mayor concentración de P en las hojas resultó con la dosis de 50 kg ha⁻¹ en combinación con Bs en las etapas de floración y madurez fisiológica.

Se encontró que los tallos tuvieron una mayor concentración de P cuando se aplicó 50 kg ha⁻¹ de P en combinación con Bs en las etapas de tercera hoja trifoliada, floración y madurez fisiológica. Sin embargo, los tratamientos con mayor concentración de P fueron aquellos inoculados con Bs, a excepción de la dosis de 100 kg ha⁻¹ en combinación con Bs, pero en la etapa de llenado de grano. Por otro lado, las concentraciones de P en las vainas fueron afectadas solo por la inoculación con Bs ($P < 0.001$). Se observó que las mayores concentraciones de P en los diferentes órganos de la planta y en las diferentes etapas fenológicas, se encontraron en los tratamientos que fueron inoculados con Bs (Cuadro 3).

La concentración de K en los tallos y hojas de la planta en las diferentes etapas fenológicas, resultó afectada por la interacción de los factores evaluados ($P \times Bs$; $P < 0.001$) (Cuadro 4). La mayor concentración de K en las hojas se encontró cuando se combinó la dosis de 50 o 100 kg ha⁻¹ de P más la inoculación con Bs en las etapas de tercera hoja trifoliada y madurez fisiológica. Sin embargo, la mayor concentración de K se encontró en plantas donde se aplicó la dosis de 100 kg ha⁻¹ de P en combinación con Bs en las etapas fenológicas de floración y llenado de grano.

Cuadro 3. Concentración de P en órganos vegetativos y reproductivos del cultivo de frijol en diferentes etapas fenológicas.
Table 3. Phosphorus concentration on vegetative and reproductive organs in common bean at different phenological stages.

Fósforo (P)	Tercera hoja trifoliada		Floración		Llenado de grano			Madurez fisiológica		
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Vainas	Hojas	Tallos	Vainas
	Concentración (%)									
0 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.17 (±0.08)	0.18 (±0.07) b	0.23 (±0.06)	0.24 (±0.04) b	0.22 (±0.04) ab	0.29 (±0.13)	0.30 (±0.04)	0.15 (±0.06) c	0.15 (±0.11) b	0.32 (±0.04)
25 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.21 (±0.12)	0.22 (±0.08) ab	0.28 (±0.02)	0.32 (±0.08) b	0.19 (±0.01) b	0.30 (±0.04)	0.29 (±0.09)	0.19 (±0.05) b	0.24 (±0.08) ab	0.28 (±0.08)
50 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.25 (±0.17)	0.32 (±0.13) a	0.37 (±0.11)	0.52 (±0.19) a	0.29 (±0.07) a	0.29 (±0.18)	0.31 (±0.07)	0.23 (±0.14) a	0.36 (±0.13) a	0.33 (±0.08)
100 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.25 (±0.17)	0.30 (±0.07) a	0.31 (±0.09)	0.27 (±0.05) b	0.29 (±0.07) a	0.18 (±0.09)	0.28 (±0.06)	0.22 (±0.09) a	0.28 (±0.02) a	0.28 (±0.07)
Probabilidad	0.068	0.004	0.057	0.001	0.019	0.359	0.975	0.536	0.013	0.905
<i>B. subtilis</i> (Bs)										
Inoculación	0.35 (±0.10) a†	0.33 (±0.08) a	0.36 (±0.09) a	0.40 (±0.18) a	0.29 (±0.07) a	0.35 (±0.07) a	0.35 (±0.02) a	0.27 (±0.06) a	0.32 (±0.11) a	0.34 (±0.03) a
Control	0.10 (±0.35) b	0.17 (±0.05) b	0.24 (±0.04) b	0.27 (±0.06) b	0.20 (±0.02) b	0.17 (±0.10) b	0.25 (±0.03) b	0.12 (±0.03) b	0.20 (±0.09) b	0.23 (±0.04) b
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	0.030	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.009	0.001
Interacción P × Bs										
0 + Inoculación	0.24 (±0.04) c	0.24 (±0.04) d	0.30 (±0.00) bc	0.27 (±0.00) cd	0.25 (±0.05) b	0.39 (±0.07) ab	0.23 (±0.07)	0.21 (±0.01) c	0.23 (±0.11) b	0.33 (±0.06)
0 + Control	0.10 (±0.00) d	0.11 (±0.01) e	0.17 (±0.01) d	0.20 (±0.02) d	0.19 (±0.01) c	0.19 (±0.08) cd	0.38 (±0.04)	0.10 (±0.00) d	0.07 (±0.02) c	0.34 (±0.08)
25 + Inoculación	0.32 (±0.02) b	0.29 (±0.01) c	0.30 (±0.00) bc	0.39 (±0.07) b	0.20 (±0.00) bc	0.34 (±0.03) ab	0.25 (±0.05)	0.24 (±0.01) bc	0.30 (±0.02) b	0.35 (±0.05)
25 + Control	0.10 (±0.00) d	0.15 (±0.04) e	0.27 (±0.02) cd	0.26 (±0.03) d	0.19 (±0.02) c	0.26 (±0.02) bc	0.33 (±0.07)	0.15 (±0.04) d	0.19 (±0.10) b	0.33 (±0.04)
50 + Inoculación	0.41 (±0.28) a	0.44 (±0.01) a	0.48 (±0.02) a	0.70 (±0.00) a	0.35 (±0.05) a	0.42 (±0.07) a	0.28 (±0.09)	0.36 (±0.03) a	0.48 (±0.07) a	0.29 (±0.07)
50 + Control	0.10 (±0.00) d	0.21 (±0.03) d	0.27 (±0.02) cd	0.35 (±0.05) bc	0.23 (±0.01) bc	0.15 (±0.17) cd	0.34 (±0.07)	0.10 (±0.00) d	0.25 (±0.05) b	0.30 (±0.03)
100 + Inoculación	0.41 (±0.28) a	0.36 (±0.02) b	0.36 (±0.11) b	0.27 (±0.04) cd	0.35 (±0.02) a	0.27 (±0.05) bc	0.20 (±0.05)	0.29 (±0.05) b	0.28 (±0.02) b	0.31 (±0.04)
100 + Control	0.10 (±0.00) d	0.23 (±0.01) d	0.27 (±0.02) cd	0.28 (±0.07) cd	0.22 (±0.01) bc	0.10 (±0.00) d	0.36 (±0.06)	0.15 (±0.04) d	0.28 (±0.01) b	0.30 (±0.03)
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.502	<0.001	0.040	0.324

† Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). ‡ Desviación estándar.

† Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). ‡ Standard deviation.

La mayor concentración de K en los tallos se encontró con la aplicación de la dosis de 50 kg ha⁻¹ de P e inoculación con Bs en etapa de primera hoja trifoliada y madurez fisiológica. En la etapa de floración se observó que la inoculación con Bs en los tratamientos favoreció a una mayor concentración de K. Finalmente, las mayores concentraciones de K en tallos se obtuvieron con la combinación de 50 o 100 kg ha⁻¹ de P inoculadas con Bs en la etapa de llenado de grano. Por otro lado, las concentraciones de K en las vainas solo respondieron al tratamiento de inoculación con Bs (Cuadro 4).

Concentración de Ca

La concentración de Ca en los tallos y en hojas de la planta fue afectada por la interacción de los factores evaluados ($P \times Bs$; $P < 0.050$) (Cuadro 5) en las diferentes etapas fenológicas. La combinación de 50 kg ha⁻¹ de P con la inoculación de Bs resultó en mayor concentración de Ca en las hojas en las etapas de tercera hoja trifoliada y madurez fisiológica. Por otra parte, se encontró la mayor concentración de Ca en las hojas cuando se aplicaron las dosis de 25 y 50 kg ha⁻¹ de P más la inoculación de Bs en la etapa de floración; mientras que la mayor concentración de Ca en dichos órganos se encontró con la dosis 100 kg ha⁻¹ de P más la inoculación con Bs en la etapa de llenado de grano.

Cuadro 4. Concentración de K en órganos vegetativos y reproductivos del cultivo de frijol en diferentes etapas fenológicas.
Table 4. Potassium concentration on vegetative and reproductive organs in common bean at different phenological stages.

Fósforo (P)	Tercera hoja trifoliada		Floración		Llenado de grano			Madurez fisiológica		
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Vainas	Hojas	Tallos	Vainas
	----- Concentración (%) -----									
0 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.40 (±0.82) b [†]	0.80 (±0.48) c	2.94 (±1.41) b	5.26 (±1.07)	4.10 (±1.14)	6.01 (±0.22)	1.90 (±0.23)	3.84 (±0.38) c	3.90 (±0.26)b	1.88 (±0.08)
25 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	3.38 (±0.53) ab	2.05 (±0.75) bc	4.20 (±0.48) ab	5.24 (±1.04)	4.29 (±1.34)	6.01 (±0.22)	1.95 (±0.45)	4.11 (±0.48) bc	3.98 (±0.36)b	1.92 (±0.06)
50 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	3.80 (±0.04) a	2.56 (±1.32) b	4.96 (±0.86) a	5.73 (±0.84)	4.33 (±0.97)	6.63 (±0.86)	2.03 (±0.15)	5.31 (±1.47) ab	6.88 (±1.28)a	2.12 (±0.07)
100 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	3.91 (±0.96) a	3.80 (±1.28) a	5.52 (±1.43) a	5.85 (±0.72)	4.98 (±1.49)	6.79 (±1.03)	1.91 (±0.53)	5.65 (±1.27) a	6.88 (±0.47)a	1.89 (±0.07)
Probabilidad	0.026	0.001	0.005	0.570	0.649	0.133	0.8	<0.001	<0.001	0.743
<i>B. subtilis</i> (Bs)										
Inoculación	4.12 (±0.75) a	3.06 (±1.61) a	5.29 (±1.14) a	6.27 (±0.45) a	5.54 (±0.53) a	6.86 (±0.76)a	2.02 (±0.23)a	5.51 (±1.26) a	5.24 (±1.70)	2.20 (±0.05)a
Control	2.62 (±0.59) b	1.54 (±0.74) b	3.52 (±1.01) b	4.76 (±0.53) b	3.30 (±0.29) b	5.86 (±0.09)b	1.70 (±0.19)b	3.94 (±0.48) b	4.26 (±0.92)	1.78 (±0.03)b
Probabilidad	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.090	0.001
Interacción P × Bs										
0 + Inoculación	3.13 (±0.05) c	0.86 (±0.75) de	4.22 (±0.10) c	6.23 (±0.25) a	5.14 (±0.17) b	6.16 (±0.20)b	1.58 (±0.33)	4.14 (±0.17) bcd	4.10 (±0.10)de	1.48 (±0.07)
0 + Control	1.66 (±0.28) d	0.73 (±0.05) e	1.66 (±0.28) d	4.30 (±0.17) c	3.06 (±0.05) d	5.86 (±0.11)b	2.20 (±0.55)	3.53 (±0.25) e	3.71 (±0.22)e	2.21 (±0.03)
25 + Inoculación	3.86 (±0.12) b	2.70 (±0.20) c	4.40 (±0.52) c	6.18 (±0.17) a	5.51 (±0.22) b	6.16 (±0.20)b	1.81 (±0.24)	4.51 (±0.22) b	4.24 (±0.25)cd	1.87 (±0.08)
25 + Control	2.90 (±0.00) c	1.40 (±0.36) d	4.00 (±0.43) c	4.30 (±0.17) c	3.06 (±0.05) d	5.86 (±0.11)b	2.10 (±0.15)	3.71 (±0.22) de	3.71 (±0.22)e	2.11 (±0.06)
50 + Inoculación	4.71 (±0.52) a	5.00 (±0.20) a	5.73 (±0.25) b	6.30 (±0.87) a	5.20 (±0.26) b	7.40 (±0.30)a	1.75 (±0.57)	6.61 (±0.18) a	8.02 (±0.06)a	1.65 (±0.08)
50 + Control	2.90 (±0.00) c	2.60 (±0.17) c	4.20 (±0.17) c	5.16 (±0.20) b	3.46 (±0.25) cd	5.86 (±0.11)b	2.31 (±0.42)	4.02 (±0.58) cde	5.73 (±0.45)b	2.41 (±0.09)
100 + Inoculación	4.78 (±0.22) a	3.70 (±0.30) b	6.83 (±0.20) a	6.40 (±0.50) a	6.33 (±0.25) a	7.72 (±0.24)a	1.66 (±0.68)	6.80 (±0.20) a	4.60 (±0.36)c	1.76 (±0.07g)
100 + Control	3.04 (±0.03) c	1.43 (±0.45) d	4.22 (±0.10) c	5.30 (±0.36) b	3.63 (±0.20) c	5.86 (±0.11)b	2.17 (±0.48)	4.50 (±0.20) bc	3.90 (±0.26)de	2.127
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.705	<0.001	<0.001	0.843

[†] Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Desviación estándar.

[†] Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Standard deviation.

Durante la etapa de tercera hoja trifoliada, las mayores concentraciones de Ca en tallos, se obtuvieron siempre que se inoculó con Bs. En las etapas fenológicas de floración y llenado de grano, la mayor concentración se obtuvo cuando se aplicó la dosis de 50 kg ha⁻¹ de P más la inoculación con Bs; En la etapa de madurez fisiológica, la mayor concentración de Ca se obtuvo cuando se utilizó P con o sin inoculación de Bs. Finalmente, la concentración de Ca en las vainas fue afectada solo por el factor de inoculación con Bs (Cuadro 5).

Concentración de Mg

En todas las etapas fenológicas, la concentración de Mg en las hojas y los tallos de la planta fue afectada por la interacción de los dos factores evaluados ($P \times Bs$; $P < 0.050$), (Cuadro 6). Una excepción lo fue la concentración de Mg en las hojas en la etapa de floración ($P \times Bs$; $P = 0.426$). En la etapa de tercera hoja trifoliada, la inoculación con Bs en combinación con la dosis de 50 kg ha⁻¹ de P incrementó la concentración de Mg en las hojas, mientras que en el control dicha concentración se redujo. En la etapa de llenado de grano, la mayor concentración de Mg en hojas fue en el tratamiento de 100 kg ha⁻¹ de P e inoculación con Bs, mientras que el menor valor fue en tratamiento solamente inoculado.

Cuadro 5. Concentración de Ca en órganos vegetativos y reproductivos del cultivo de frijol en diferentes etapas fenológicas.
Table 5. Calcium concentration on vegetative and reproductive organs in common bean at different phenological stages.

Fósforo (P) Etapa fenológica	Tercera hoja trifoliada		Floración		Llenado de grano			Madurez fisiológica		
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Vainas	Hojas	Tallos	Vainas
	----- Concentración (%) -----									
0 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.09 (±0.42) b [†]	1.19 (±0.34)	0.78 (±0.56)	0.49 (±0.08) b	5.42 (±0.99) b	1.26 (±0.15) b	0.95 (±0.05)	1.10 (±0.35) c	1.09 (±0.18) b	0.87 (±0.06)
25 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.39 (±0.42) ab	1.35 (±0.25)	0.95 (±0.94)	0.56 (±0.12) b	5.80 (±0.62) b	1.26 (±0.15) b	0.92 (±0.05)	1.49 (±0.37) c	2.21 (±1.15) a	0.88 (±0.08)
50 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.76 (±0.40) a	1.30 (±0.22)	1.40 (±0.44)	0.76 (±0.19) a	6.50 (±1.29) ab	2.24 (±1.08) a	0.96 (±0.08)	5.98 (±1.71) a	2.55 (±0.26) a	0.94 (±0.05)
100 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2.60 (±0.25) a	1.26 (±0.17)	1.33 (±0.18)	0.46 (±0.09) b	7.44 (±1.05) a	1.81 (±0.70) ab	1.00 (±0.04)	4.28 (±0.52) b	2.74 (±0.39) a	1.02 (±0.06)
Probabilidad	0.036	0.761	0.248	0.004	0.014	0.047	0.215	<0.001	0.002	0.216
<i>B. subtilis</i> (Bs)										
Inoculación	2.75 (±0.28) a	1.49 (±0.11) a	1.59 (±0.25) a	0.66 (±0.18) a	7.17 (±0.94) a	2.06 (±0.87) a	1.00 (±0.02) a	3.84 (±2.57)	2.19 (±0.88)	0.99 (±0.04) a
Control	2.17 (±0.37) b	1.07 (±0.11) b	0.64 (±0.50) b	0.47 (±0.09) b	5.40 (±0.76) b	1.22 (±0.11) b	0.92 (±0.03) b	2.58 (±1.71)	2.05 (±0.97)	0.89 (±0.05) b
Probabilidad	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	0.003	0.007	0.170	0.245	0.007
Interacción P × Bs										
0 + Inoculación	2.42 (±0.10) bcd	1.49 (±0.12) a	1.24 (±0.06) bc	0.53 (±0.11) cd	6.30 (±0.21) c	1.30 (±0.20) c	0.90 (±0.06)	1.40 (±0.20) cd	1.13 (±0.15) bc	0.89 (±0.05)
0 + Control	1.75 (±0.30) e	0.90 (±0.10) c	0.32 (±0.41) d	0.46 (±0.05) de	4.53 (±0.25) e	1.22 (±0.13) c	1.01 (±0.08)	0.80 (±0.00) d	0.85 (±0.02) c	1.11 (±0.06)
25 + Inoculación	2.65 (±0.11) bc	1.57 (±0.07) a	1.81 (±0.11) a	0.66 (±0.07) b	6.35 (±0.18) c	1.30 (±0.20) c	0.89 (±0.06)	1.83 (±0.08) c	2.30 (±0.21) ab	0.88 (±0.07)
25 + Control	2.13 (±0.49) de	1.12 (±0.04) b	0.08 (±0.01) d	0.40 (±0.05) e	5.25 (±0.20) d	1.22 (±0.13) c	0.96 (±0.08)	1.16 (±0.15) d	2.12 (±1.35) ab	0.98 (±0.05)
50 + Inoculación	3.12 (±0.00) a	1.49 (±0.14) a	1.81 (±0.08) a	0.93 (±0.08) a	7.66 (±0.20) b	3.23 (±0.15) a	0.94 (±0.07)	7.46 (±0.76) a	2.76 (±0.11) a	0.94 (±0.07)
50 + Control	2.40 (±0.12) cd	1.12 (±0.04) b	1.00 (±0.00) c	0.59 (±0.05) bc	5.33 (±0.25) d	1.26 (±0.09) c	0.97 (±0.06)	4.50 (±0.45) b	2.33 (±0.15) a	0.97 (±0.06)
100 + Inoculación	2.80 (±0.15) ab	1.41 (±0.12) a	1.49 (±0.01) ab	0.52 (±0.02) cde	8.38 (±0.23) a	2.43 (±0.25) b	0.95 (±0.05)	4.70 (±0.20) b	2.59 (±0.56) a	0.95 (±0.08)
100 + Control	2.40 (±0.12) cd	1.12 (±0.04) b	1.17 (±0.07) bc	0.46 (±0.10) de	6.50 (±1.05) c	1.19 (±0.15) c	1.06 (±0.08)	3.86 (±0.35) b	2.88 (±0.12) a	1.01 (±0.05)
Probabilidad	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.704	<0.001	0.001	0.405

[†] Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Desviación estándar.

[†] Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Standard deviation.

En la etapa de hoja trifoliada, se obtuvo la mayor concentración de Mg en los tallos cuando solamente se inoculó con Bs o cuando se inoculó con Bs y se fertilizó con P. Durante la floración, la mayor concentración de Mg apareció cuando solo se inoculó con Bs. Durante el llenado de grano, sucedió lo mismo, aunque también las más altas concentraciones de Mg aparecieron cuando se inoculó con Bs y se combinó con dosis mayores de P 50 kg ha⁻¹. Finalmente, durante la madurez fisiológica, la mayor concentración de Mg sucedió cuando se inoculó con Bs y se aplicó una dosis de 50 P kg ha⁻¹. Por último, la concentración de Mg en las vainas en las etapas de llenado de grano y madurez fisiológica, resultó afectada solo por la inoculación de Bs ($P < 0.050$), (Cuadro 6).

Absorción de Macronutrientes

Debido a que no se encontró interacción en la absorción de macronutrientes por efecto de los factores evaluados ($P \times Bs$; $P > 0.050$), se explica la respuesta de cada factor por separado. La absorción de N resultó afectada por la dosis de P desde la floración hasta la madurez del cultivo (Figura 1A). La aplicación de P realizó la absorción de N en floración (43 kg ha⁻¹), pero en llenado de grano, se requirieron dosis de P por encima de los 50 kg ha⁻¹ para hacer la diferencia con el testigo.

Cuadro 6. Concentración de Mg en órganos vegetativos y reproductivos del cultivo de frijol en diferentes etapas fenológicas.
Table 6. Magnesium concentration on vegetative and reproductive organs in common bean at different phenological stages.

Fósforo (P) Etapa fenológica	Tercera hoja trifoliada		Floración		Llenado de grano			Madurez fisiológica		
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Vainas	Hojas	Tallos	Vainas
	Concentración (%)									
0 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.62 (±0.62)	0.48 (±0.24)	0.37 (±0.28)	0.34 (±0.24)	1.32 (±0.37) b	0.34 (±0.24)	0.88 (±0.05)	1.07 (±0.64) b	0.19 (±0.07)	0.98 (±0.07)
25 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.58 (±0.06)	0.33 (±0.25)	0.29 (±0.21)	0.24 (±0.12)	1.55 (±0.60) b	0.24 (±0.12)	0.77 (±0.03)	1.23 (±0.82) b	0.21 (±0.09)	0.76 (±0.06)
50 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.64 (±0.13)	0.37 (±0.19)	0.43 (±0.11)	0.31 (±0.16)	1.72 (±0.50) b	0.37 (±0.24)	0.81 (±0.02)	1.72 (±0.50) ab	0.31 (±0.16)	0.91 (±0.04)
100 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0.61 (±0.09)	0.32 (±0.13)	0.26 (±0.08)	0.24 (±0.06)	2.36 (±0.30) a	0.46 (±0.28)	0.87 (±0.05)	2.45 (±0.35) a	0.24 (±0.06)	0.88 (±0.06)
Probabilidad	0.791	0.566	0.460	0.604	0.006	0.447	0.156	0.003	0.238	0.158
<i>B. subtilis</i> (Bs)										
Inoculación	0.69 (±0.06) a [†]	0.52 (±0.09) a	0.37 (±0.24)	0.40 (±0.13)a	2.10 (±0.36) a	0.54 (±0.16)a	0.90 (±0.35)a	2.11 (±0.44) a	0.31 (±0.09)a	0.91 (±0.02)a
Control	0.54 (±0.05) b	0.22 (±0.18) b	0.31 (±0.11)	0.16 (±0.06)b	1.38 (±0.54) b	0.16 (±0.06)b	0.75 (±0.35)b	1.13 (±0.75) b	0.16 (±0.06)b	0.77 (±0.03)b
Probabilidad	<0.001	<0.001	0.427	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Interacción P × Bs										
0 + Inoculación	0.70 (±0.04) ab	0.55 (±0.13) a	0.27 (±0.08)	0.55 (±0.11)a	1.64 (±0.17) c	0.55 (±0.11)a	0.77 (±0.35)	1.64 (±0.17) cd	0.25 (±0.00)bc	0.87 (±0.04)
0 + Control	0.54 (±0.06) c	0.41 (±0.34) ab	0.47 (±0.40)	0.13 (±0.05)e	1.00 (±0.00) d	0.13 (±0.05)c	0.98 (±0.35)	0.50 (±0.10) e	0.13 (±0.05)d	0.99 (±0.06)
25 + Inoculación	0.63 (±0.02) bc	0.56 (±0.09) a	0.36 (±0.01)	0.34 (±0.07)bc	2.10 (±0.10) ab	0.34 (±0.07)b	0.71 (±0.35)	1.96 (±0.25) bc	0.29 (±0.02)b	0.74 (±0.03)
25 + Control	0.54 (±0.06) c	0.10 (±0.00) c	0.23 (±0.31)	0.14 (±0.05)e	1.00 (±0.00) d	0.14 (±0.05)c	0.83 (±0.35)	0.50 (±0.10) e	0.14 (±0.05)d	0.85 (±0.05)
50 + Inoculación	0.75 (±0.08) a	0.54 (±0.07) a	0.52 (±0.06)	0.46 (±0.06)ab	2.11 (±0.12) ab	0.58 (±0.13)a	0.74 (±0.35)	2.11 (±0.12) b	0.46 (±0.06)a	0.84 (±0.05)
50 + Control	0.54 (±0.06) c	0.20 (±0.00) bc	0.33 (±0.05)	0.17 (±0.04)de	1.34 (±0.41) cd	0.17 (±0.04)c	0.89 (±0.35)	1.34 (±0.41) d	0.17 (±0.04)cd	0.89 (±0.06)
100 + Inoculación	0.68 (±0.03) ab	0.44 (±0.03) a	0.33 (±0.05)	0.26 (±0.05)cd	2.54 (±0.27) a	0.71 (±0.12)a	0.79 (±0.35)	2.72 (±0.19) a	0.26 (±0.05)b	0.89 (±0.07)
100 + Control	0.54 (±0.06) c	0.20 (±0.00) bc	0.20 (±0.00)	0.21 (±0.08)de	2.18 (±0.23) ab	0.21 (±0.08)bc	0.95 (±0.35)	2.18 (±0.23) b	0.21 (±0.08)bcd	0.94 (±0.04)
Probabilidad	0.001	0.003	0.426	<0.001	<0.001	<0.001	0.846	<0.001	0.001	0.475

[†] Valores con letras diferentes en cada columna son significativamente diferentes. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Desviación estándar.

[†] Values with different letters on each column indicate significant differences. Tukey ($P = 0.05$). [‡] Standard deviation.

La máxima acumulación de N se llevó a cabo durante el llenado de grano y fue en promedio de 114 kg ha⁻¹. Finalmente, al llegar a la madurez fisiológica, la aplicación de P superó en la absorción de N en comparación al tratamiento testigo.

La absorción de P en el cultivo resultó afectada por la dosis de P desde la etapa de floración hasta la madurez fisiológica del cultivo (Figura 1B). En floración se requirió de la dosis de 50 kg P para hacer la diferencia entre los tratamientos evaluados. En la etapa de llenado de grano, se requirieron de dosis de 50 a 100 kg de P para una absorción promedio de 12 kg ha⁻¹ de P. Al llegar a la etapa de madurez fisiológica, la aplicación de las distintas dosis de P superó en la absorción del mismo en comparación al tratamiento testigo, cuya absorción promedio fue de 5.3 kilogramos por hectárea.

La absorción de K aumentó gradualmente desde floración maximizando en etapa de llenado de grano para posteriormente declinar al final del ciclo. Se aprecia que las dosis por encima de 50 kg de P promovieron una absorción máxima de 178.4 kg ha⁻¹ de K en comparación con las dosis menores (Figura 1C).

La absorción de Ca fue relativamente constante hasta la etapa de floración, posteriormente se maximizó exponencialmente en llenado de grano, declinando al final del ciclo. Se puede observar que las dosis de 50 y 100 kg ha⁻¹ de P contribuyeron fuertemente a una mayor absorción de Ca en comparación con las dosis menores.

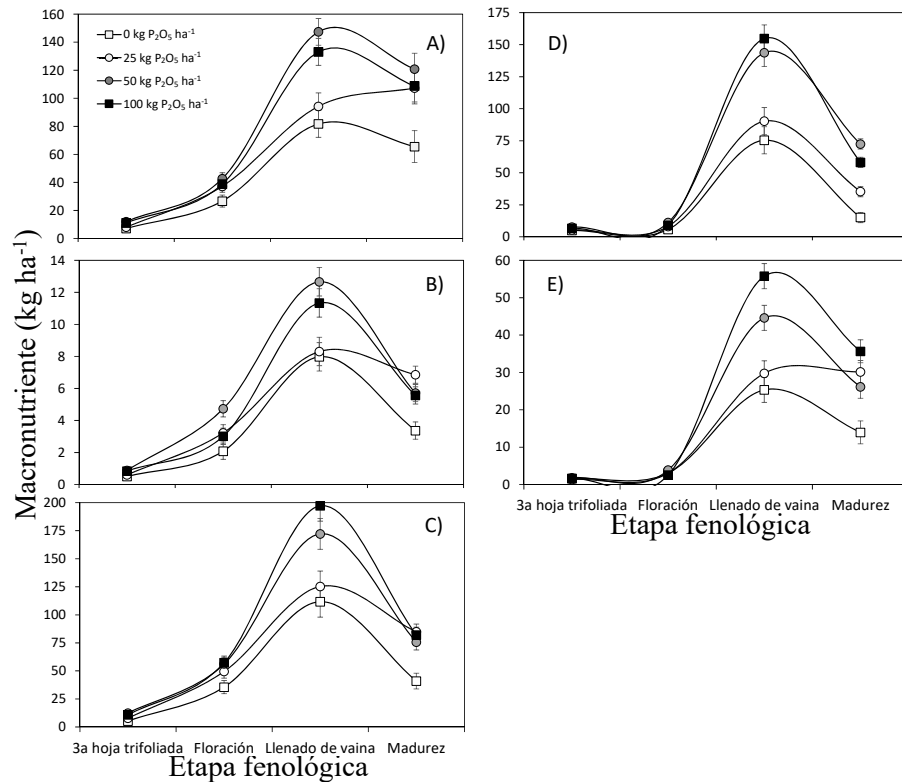


Figura 1. Absorción de A) nitrógeno, B) fósforo, C) potasio, D) calcio y E) magnesio, en el cultivo de frijol por efecto de cuatro dosis de fósforo.

Figure 1. Uptake of A) nitrogen, B) phosphorus, C) potassium, D) calcium and E) magnesium as a function of phosphorus doses in common bean crop.

Se encontró que al fertilizar con dosis mayores de 50 kg de P se alcanzó una absorción máxima de 152 kg ha⁻¹ de Ca en etapa de máxima demanda (llenado de grano) (Figura 1D). La cantidad de Ca absorbido disminuyó drásticamente en madurez de aproximadamente 90 kg ha⁻¹ para todas las dosis empleadas.

La máxima absorción de Mg ocurrió en la etapa de llenado de grano (57.6 kg ha⁻¹), (Figura 1E) y se obtuvo con la aplicación de 100 kg de P, seguida de la dosis de 50 kg de P y finalmente el resto de las dosis. Al llegar el cultivo a madurez fisiológica, la máxima absorción de Mg fue en el orden de 100, 50 y 25 kg ha⁻¹ de P y el testigo sin fertilizar con P con valores de 37, 32, 28 y 17 kg ha⁻¹ de Ca respectivamente. De manera general, se encontró que la absorción total de macronutrientes fue en el siguiente orden preferencial K > N > Ca > Mg > P.

Adicionalmente se pudo observar que, en la mayoría de las etapas fenológicas, la inoculación con Bs superó al tratamiento testigo (Figura 2). Para el caso de N (Figura 2A), la absorción aumento gradualmente desde la floración hasta la madurez fisiológica del cultivo. La mayor cantidad de N absorbido ocurrió en la etapa de llenado grano, en la cual el cultivo acumuló la cantidad de 138 kg ha⁻¹ de N. Para el caso de la absorción de P, las diferencias entre los tratamientos de inoculación y control fueron las mismas que para el caso de la absorción de N. se cuantificó que la mayor absorción fue de 11.7 kg ha⁻¹ de P en la etapa anteriormente mencionada (Figura 2B).

La absorción de K, Ca y Mg por el cultivo fue influenciada favorablemente por el tratamiento inoculación con Bs, desde la etapa de llenado de grano hasta la madurez fisiológica. La mayor absorción de K fue 174.3 kg ha⁻¹ (Figura 2C); 127.4 kg ha⁻¹ de Ca (Figura 2D) y 46.7 kg ha⁻¹ de Mg (Figura 2E).

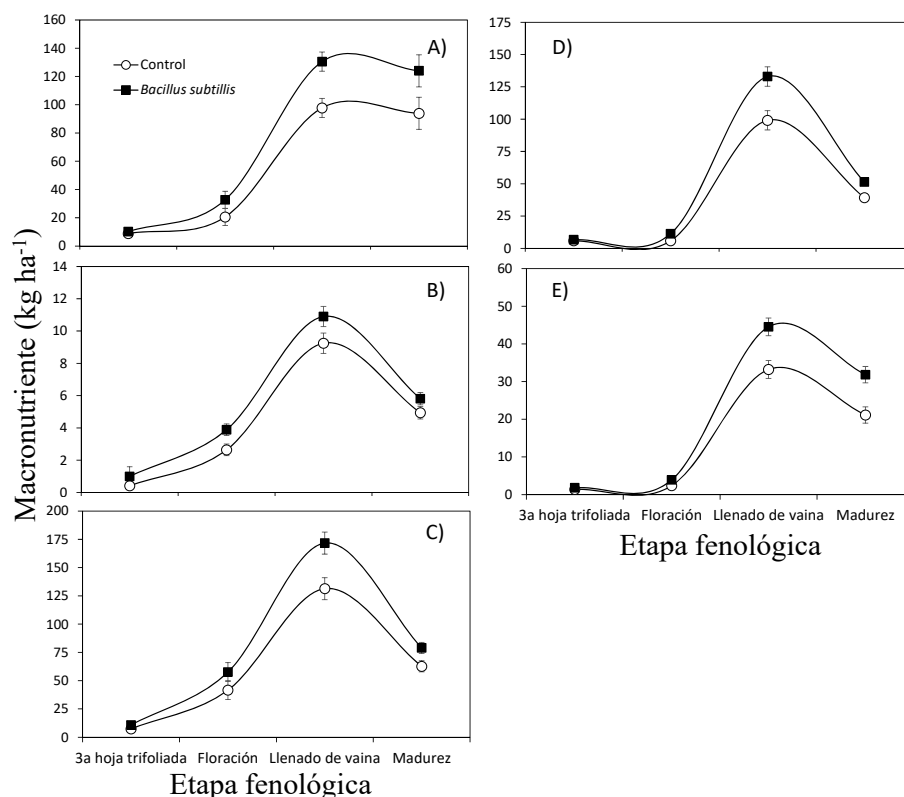


Figura 2. Absorción de A) nitrógeno, B) fósforo, C) potasio, D) calcio y E) magnesio, por efecto de la inoculación con *Bacillus subtilis* en el cultivo de frijol.

Figure 2. Uptake of A) nitrogen, B) phosphorus, C) potassium, D) calcium and E) magnesium as a function of inoculation with *Bacillus subtilis* in common bean crop.

En este estudio la aplicación de dosis de P e inoculación con Bs proporcionaron información general sobre la acumulación de biomasa, así como la concentración, distribución y absorción de macronutrientes en el cultivo de frijol. Los resultados demostraron que ambos factores actuaron por separado en las variables evaluadas. Al respecto, Chimdi, Negasa y Chala (2022), indican que la interacción de ambos factores solo es posible, cuando las concentraciones de P en suelo suelen ser limitantes para el crecimiento del cultivo. Turuko y Mohammed (2014), mencionan que cuando se identifica respuesta, esta se refleja en un incremento del peso seco de los tallos y en el número y peso de las vainas.

La máxima acumulación de biomasa seca en el cultivo se produjo durante la etapa de llenado de grano. Los máximos valores de biomasa seca resultaron en dosis mayores a 50 kg ha⁻¹ de P y ahí se mantuvieron. Fageria y Baligar (2016) y Gómez, Vadez, Hernández, Sánchez y Toscano (1996) mencionan que la producción de biomasa no siempre está en relación lineal con el suministro de P, y que es común observar que, a mayor dosis de P aplicado, se disminuye la recuperación del mismo por la planta, modificando así la eficiencia en la absorción y distribución. Algunas excepciones encontradas con la respuesta a las dosis de P se encuentran condicionadas al genotipo estudiado (Attar, Blavet, Selim, Abdelhamid y Drevon 2012).

Algunos estudios muestran que existen respuestas variables o baja eficiencia agronómica de distintos cultivos cuando se suministran lo que se consideran dosis altas de P, y que ello se debe principalmente a los siguientes efectos: 1) cambios de pH en la solución del suelo después de la fertilización (Hopkins, 2015), 2) baja

absorción o efecto limitante de otros nutrientes (Mengel y Kirkby, 2000), y 3) gran parte del P aplicado queda atado en la zona de contacto (Havlin, Beaton, Tisdale y Nelson, 2005). Dicho proceso se ha reportado en cultivos como maíz (*Zea mays*) (Hussein, 2009), frijol común (Gidago, Beyene y Worku, 2011; Girma, Demelash y Ayele, 2014) y frijol soya (*Glycine max*) (Devi et al., 2012).

De manera general, los resultados de concentración de macronutrientes en tejidos de la planta son similares a lo reportado por Lata-Tenesaca, Villaseñor y Chabla (2017), quienes encontraron que las hojas acumularon la mayor cantidad de nutrientes. De acuerdo a Urzúa (2005), el cultivo de frijol tiene altas concentraciones de N especialmente en las hojas y granos. Mientras que Puentes-Páramo, Menjivar, Gómez y Aranzazu (2014) encontraron relativamente bajas concentraciones de P y Mg en tejidos, argumentando que el Mg tiende a acumularse en los tejidos foliares dependiendo la edad de la planta.

Así mismo, la mayor concentración de K encontrada en los tallos concuerda con los hallazgos de Basimine-Geant et al. (2020), quienes mencionan que en algunos casos este nutriente es acumulado en mayor cantidad en este órgano que el N o P. También mencionan que posteriormente es translocado a las hojas y frutos de la planta. En nuestro estudio se observó que al final del ciclo, la reducción de Ca en las hojas y tallos fue atribuida principalmente a la abscisión de hojas y senescencia del cultivo ya que la movilización de este nutriente hacia los tejidos foliares es reducida.

La mejoría en la adquisición de N por la raíz de las plantas está asociada al aumento en la velocidad de mineralización de la materia orgánica en el suelo y a la potencialización de la fijación biológica del N producida por *Bacillus* spp. (Singh et al., 2016). Por ejemplo, en maíz fertilizado y cultivado en suelo, *Bacillus pumilus* S1r1 incrementó la capacidad de fijación de nitrógeno por la raíz, hasta alcanzar a absorber un 30.5% más de N con relación al control sin inoculación con bacteria (Kuan, Othman, Abdul-Rahim y Shamsuddin, 2016). Incluso en sistemas acuapónicos en donde se utiliza solución nutritiva, la adición de *Bacillus* spp., ha demostrado su efectividad al aumentar la producción de biomasa en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), así como incrementar la cantidad de fósforo en los tejidos, además de lograr una mayor concentración de clorofila en las hojas (da Silva y Fitzsimmons, 2016).

Al igual que *Bacillus subtilis* solubiliza el P haciéndolo disponible a la planta, lo mismo hace con el K del suelo. Al respecto, Singh-Meena, Maurya y Verma (2014) indican que la actuación de *B. subtilis* estriba en movilizar y solubilizar K, silicatos y el aluminio de minerales insolubles. Así mismo, genera la producción de ácidos orgánicos con cargas negativas (citrato, malato y oxalato). Lo anterior permite una mayor absorción de minerales y repercute en el incremento de la concentración de N, K, Ca y hierro en las hojas y los frutos de las plantas (Veresoglou et al., 2011).

Armada, Azcon, López, Calvo y Ruiz (2015) encontraron que la aplicación de *Bacillus megatherium*, *B. thuringiensis* y *Bacillus* spp., incrementó las concentraciones de Mg, Zn, Mn y Cu en el tejido foliar en plantas de lavanda (*Lavandula angustifolia*) y salvia (*Salvia officinalis*) bajo condiciones de sequía. Resultados similares han sido reportados en el cultivo de garbanzo (*Cicer arietinum*) (Abd-Allah et al., 2018).

Adicionalmente, el patrón de acumulación de nutrientes durante el desarrollo del cultivo de frijol mostró un comportamiento sigmoidal, lo cual es similar al reportado por da Cunha, Chaves, Kano, Braga y de Olivera (2020) (Figura 1 y 2). El periodo de máxima absorción de nutrientes fue entre la floración y el llenado de grano, y concordó con la máxima acumulación de materia seca del cultivo (Cuadro 1). El orden preferencial de absorción de nutrientes en este estudio es muy similar a lo encontrado por Lata-Tenesaca et al. (2017), quienes reportaron una absorción total en el orden N>K>Ca>Mg>P; Por su parte, Peres-Soratto et al. (2013) y Facco-Pergoraro, Oliveira, Goncalves, Koiti y Figueiredo (2014) reportaron que la preferencia en absorción fue N> K> Ca> P> Mg> S y K>N>Ca>P>Mg respectivamente.

Por otro lado, al aplicar 50 y 100 kg ha⁻¹ de P, la absorción de N superó a la dosis de 25 kg ha⁻¹ de P y al testigo, en casi un 80%. Así mismo, la aplicación de 50 y 100 kg de P, incrementó la acumulación de N, P, K y Ca. Al respecto, Fageria, Zimmermann y Baligar (1995) encontraron que conforme se incrementó la dosis de P, se incrementó la absorción de macronutrientes en cultivos de arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), maíz y frijol. Por otro lado, la inoculación con Bs incrementó en todo momento la acumulación de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg. Al respecto, los resultados concuerdan con los de Solanki *et al.* (2014) y Singh, Prasad y Goel (2018) quienes reportaron que la inoculación con PGPR incrementan la absorción de macronutrientes como N y P, así como la del hierro.

Con respecto a la inoculación de semilla con *B. subtilis*, Lastochkina *et al.* (2021) indican que, con esta práctica, el cultivo manifiesta un incremento en la longitud radicular, además de un aumento en la concentración de lignina. Igualmente, estudios señalan que *B. subtilis* promueve un incremento en el peso seco de la raíz, además de que, fisiológicamente reduce la conductancia estomática promoviendo una mayor eficiencia en el uso del agua (Coelho-de Lima *et al.*, 2019). En este sentido, cuando las plantas poseen un mayor número de raíces, éstas proveen una mayor adquisición de agua y nutrientes necesarios para la producción de biomasa aérea (Abdolzadeh, Wang, Veneklaas y Lambers, 2010).

Se encontró que el proceso de inoculación con la cepa *B. subtilis* Q11[®] promovió una mayor absorción de P durante el ciclo del cultivo, por consiguiente, un mayor crecimiento de raíz está fuertemente asociado a una mayor absorción de nutrientes favoreciendo así un mayor crecimiento de la parte aérea en las dos últimas etapas de desarrollo. Además, el proceso de solubilización puede reponer aquellos nutrientes en la solución del suelo que han sido tomados por las plantas. Estos resultados son similares a lo reportado por García y Delgado (2016) quienes probaron que la cepa de *B. subtilis* QST713 fue altamente efectiva al aumentar la absorción de P en las plantas, independientemente de la solubilidad de la fuente aplicada (fertilizante) o de la capacidad de adsorción del medio. Así mismo, argumentaron que el beneficio en la absorción de P podría atribuirse principalmente al aumento en la solubilización desde la rizósfera y con ello un mayor crecimiento radicular.

Según lo indicado por Yao *et al.*, (2006), la biofertilización con *B. subtilis* FZB 241[®] puede aumentar el crecimiento de las plantas al movilizar y tomar más nutrientes del medio. Sin embargo, mencionan que la efectividad de los productos depende de las condiciones climáticas, tipo de suelo, nivel de fertilidad, así como de la presencia de nutrientes en el medio. Por otra parte, Murugan, Swaminathan, Niemsdorff y Karthikeyan (2011) también argumentaron que la aplicación de biofertilizantes a base de *Rhizobium leguminosarum-phaseoli* o *Pseudomonas fluorescens* en combinación con estiércol aumentó la disponibilidad de C, N y P, la población microbiana en la zona de raíces, así como la productividad de frijol negro (*Vigna mungo* L.).

De acuerdo a la interacción de P × Bs, esta afectó la concentración de todos los macronutrientes en los órganos de la planta, con excepción de las vainas en las etapas de llenado de grano y madurez fisiológica. El sinergismo entre bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) y la fertilización mineral ha sido documentado. La función de Bs Q11[®] es asociativa con la fertilización mineral, y estriba en que *Bacillus* spp. tiene la capacidad de mineralizar N de la materia orgánica del suelo, incrementar la fijación de N, producir auxinas y acidificar el medio de crecimiento (Elkoca, Turan y Donmez, 2010). Esto último repercute en una solubilización de fosfatos, potasio y micronutrientes, haciéndolos mayormente disponibles al cultivo (Acurio-Vasconez *et al.*, 2020).

Finalmente, algunos autores proponen que la disponibilidad de nutrientes en suelos está determinada en gran medida por el estado iónico en el que los nutrientes

alcanzan la superficie radicular (Bray, 1954) y que ello influencia parcialmente la efectividad de las aplicaciones de fertilizantes (Havlin et al., 2005). No obstante, la habilidad del sistema radicular está fuertemente influenciado por propiedades físicas del suelo, así como el daño que ocasionan ciertas plagas al alimentarse principalmente de raíces jóvenes.

CONCLUSIONES

La acumulación y distribución de la biomasa seca en la planta de frijol resultó afectada de forma independiente por la fertilización con P y la inoculación a la semilla con *B. subtilis*. Sin embargo, la combinación de ambos factores, afectó la concentración de macronutrientes en los órganos de la planta en la mayoría de las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Una excepción ocurrió en las vainas del cultivo. Lo anterior es de importancia sobre todo si se justifica como biofortificar el grano para consumo alimenticio, de tal manera que habría que buscar alternativas diferentes para lograr este objetivo.

No se identificó interacción en la absorción de macronutrientes por efecto de los factores evaluados. Generalmente las dosis de 50 y 100 kg ha⁻¹ de P fueron las que incrementaron la mayor cantidad de macroelementos en la etapa de llenado de vaina, lo que concuerda con la mayoría de los reportes encontrados en la literatura. Por otro lado, la inoculación a la semilla con *B. subtilis*, incrementó significativamente la absorción de los macronutrientes en la etapa de llenado de vaina. Al respecto, es una alternativa para la reducción del uso de fertilizante fosforado y a una reducción en los costos de producción.

DECLARACIÓN DE ETICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Se agradece a la empresa Química Internacional Aplicada S.A de C.V por proporcionar el inoculante *Bacillus subtilis* Q11* y las instalaciones para la conducción del ensayo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Escritura del manuscrito original: J.D.R.R.I. análisis de datos: F.N.R. Revisión y edición: L.A.P.F., C.M.P., y C.S.R.F. Visualización: H.C.M. Contribuciones de escritura: Q.A.A.A.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo en la toma de datos a practicantes de la FAVF, así como al M.C. Francisco Medina y su gran equipo de colaboradores en QUIMIA S.A de C.V.

LITERATURA CITADA

- Abdolzadeh, A., Wang, X., Veneklaas, E. J., & Lambers, H. (2010). Effects of phosphorus supply on growth, phosphate concentration and cluster-root formation in three *Lupinus* species. *Annals of Botany*, 105(3), 365-374. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp297>
- Abd-Allah, E. F., Al-qarawi, A. A., Hashem, A., Radhakrishnan, R., Al-Huqail, A. A., Al-Otibi, F. O. N., ... Egamberdieva, D. (2018). Endophytic bacterium *Bacillus subtilis* (BERA 71) improves salt tolerance in chickpea plants by regulating the plant defense mechanisms. *Journal of Plants Interactions*, 13(1), 37-44. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1414321>
- Acurio-Vasconez, R. D., Mamarandi-Mosoort, J. E., Ojeda-Shagnay, A. G., Tenorio-Moya, E. M., Chiluisa-Utreras, V. P., & Vaca-Suquillo, I. A. (2020). Evaluation of *Bacillus* spp. as plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) and lettuce (*Lactuca sativa*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1465
- Armada, E., Azcon, R., López-Castillo, O. M., Calvo-Polanco, M., & Ruiz-Lozano, J. M. (2015). Autochthonous arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus thuringiensis* from a degraded Mediterranean area can be used to improve physiological traits and performance of a plant of agronomic interest under drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 90, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.03.004>
- Attar, H. A., Blavet, D., Selim, E. M., Abdelhamid, M. T., & Drevon, J. J. (2012). Relationship between phosphorus status and nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under drip irrigation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 1-13.
- Basimine-Geant, C., Bora-Francine, S., Ndeko-Adrien, A. B., Wasolu, N., Mulalisi, B., Bagula-Espoir, M., ... Nachigera-Gustave, M. (2020). Optimal fertiliser dose and nutrients allocation in local and biofortified bean varieties grown on ferralsols in eastern Democratic Republic of the Congo. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1805226. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1805226>
- Bertsch-Hernández F. (2004). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. (1^{ra} ed). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Bradstreet, R. B. (1965). *The Kjeldahl method for organic nitrogen*. New York, NY, USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12545-7>
- Bray, R. H. (1954). A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. *Soil Science*, 78(1), 9-22.
- Cisneros-Rojas, C. A., Sánchez-de Prager, M., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Identificación de bacterias solubilizadoras de fosfatos en un Andisol de la región cafetera colombiana. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 21-28. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.65966>
- Chimdi, A., Negasa, D., & Chala, G. (2022). Effects of rhizobium inoculation and P fertilizer levels on selected soil properties, yield, and yield components of faba bean (*Vicia faba* L.): The case of Abuna Gindeberat, west Shewa Zone, Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, 1-10 <https://doi.org/10.1155/2022/3635989>
- Coelho-de Lima, B., Lima-Moro, A., Pacheco-Santos, A. C., Bonifacio, A., Ferreira-Araujo, A. S., & Fernando-de Araujo, F. (2019). *Bacillus subtilis* ameliorates water stress tolerance in maize and common bean. *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 432-439. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1645896>
- da Silva-Cerozi, B., & Fitzsimmons, K. (2016). Use of *Bacillus* spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. *Scientia Horticulturae*, 211, 227-282.
- da Cunha, A. L. B., Chaves, F. C. M., Kano, C., Braga, I. G., & de Olivera, M. R. (2020). Nutrient uptake rate for yard long bean. *Horticultura Brasileira*, 38(2), 175-184. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620200210>
- Devi, K. N., Singh, L. N. K., Devi, T. S., Devi, H. N., Singh, T. B., Singh, K. K., & Singh, W. M. (2012). Response of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to sources and levels of phosphorus. *Journal of Agricultural Science* 4, 44-53. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n6p44>
- Emam, Y., Shekoofa, A., Salehi, F., & Jalali, A. H. (2010). Water stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. *American-Eurasian Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 9(5), 495-499.
- Elkoca, E., Turan, M., & Donmez, M. F. (2010). Effects of single, dual and triple inoculations with *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* and *Rhizobium leguminosarum* Bv. Phaseoli on nodulation, nutrient uptake, yield and yield parameters of common bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. "elkoca-05". *Journal of Plant Nutrition*, 33(14), 2104-2119. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.519084>
- Facco-Pergoraro, R., Oliveira, D., Gonçalves-Moreira, C., Koiti-Kondo, M., & Figueiredo-Portugal, A. (2014). Partição de biomassa e absorção de nutrientes pelo feijoeiro comum. *Revista Caatinga*, 27(3), 41-52.
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2016). Growth yield and yield components of dry beans is influenced by phosphorus in tropical acid soils. *Journal of Plant Nutrition*, 39(4), 562-568. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143489>
- Fageria, N. K., Zimmermann, F. J. P., & Baligar, V. C. (1995). Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean and corn in an oxisol. *Journal of Plant Nutrition*, 18(11), 2519-2532. <https://doi.org/10.1080/01904169509365081>

- García-López, A. M., & Delgado, A. (2016). Effect of bacillus subtilis on phosphorous uptake by cucumber as affected by iron oxides and the solubility of phosphorous source. *Agricultural and Food science*, 25, 216-224.
- Gidago, G., Beyene, S., & Worku, W. (2011). The response of haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to phosphorus application on Ultisols at Areka, Southern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 1(3), 38-49.
- Girma, A., Demelash, A., & Ayele, T. (2014). The response of haricot bean varieties to different rates of phosphorus at Arba Minch, Southern Ethiopia. *ARPJ Journal of Agriculture and Biological Science*, 9, 344-350.
- Gómez, L. A., Vadez, V., Hernández, G., Sánchez, T., & Toscano, V. (2016). Phosphorus use efficiency in 10 common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 7(1), 41-46. <https://doi.org/10.15517/am.v7i1.24787>
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management*. (7th ed.). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.
- Heppell, J., Payvandi, S., Talboys, P., Zygalakis, K. C., Fliege, J., Langton, D., ... Roose, T. (2016). Modelling the optimal phosphate fertilizer and soil management strategy for crops. *Plant Soil* 401, 135-149.
- Hopkins, B. G. (2015). Phosphorus. In: A. V. Barker, & D. J. Pilbeam (Eds.). *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 65-126). Boca Ratón, FL, USA: CRC Press.
- Hussein, A. H. A. (2009). Phosphorus use efficiency by two varieties of corn at different Phosphorus fertilizer application rates. *Research Journal of Applied Science*, 4(2), 85-93.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Edafología*. Consultado el 20 de febrero, 2020, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Kanyenga, L. A., Kasongo, L. M., Kizungu, V. R., Nachigera, M. G., & Kalonji, M. A. (2016). Effect of climate change on common bean (*Phaseolus vulgaris*) crop production: determination of the optimum planting period in midlands zones of the Democratic Republic of Congo. *Global Science Research Journals*, 4(1), 390-399.
- Kochian, L.V. (2012). Plant nutrition: Rooting for more phosphorus. *Nature*, 488(7412), 466-467.
- Kuan, K. B., Othman, R., Abdul-Rahim, K., & Shamsuddin, Z. H. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. *PLoS One*, 11(3), e0152478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152478>
- Lastochkina, O., Garshina, D., Allagulova, C., Pusenkova, L., Garipova, S., Maslennikova, D., ... Aliniaefard, S. (2021). Potential aspects of plant growth promoting bacteria to improve horticultural crop production. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 8(2), 103-122.
- Lata-Tenesaca, L., Villaseñor-Ortiz, D., & Chabla-Carrillo, J. (2017). Fraccionamiento de la absorción de nutrientes en cuatro etapas fenológicas del cultivo de frijol. *Revista Universidad y Sociedad*, 9(1), 20-27.
- Lima, R. T., Nascimento, V., Junior, R. A. (2016). Densidade de plantas e fontes de nitrogênio no cultivo de feijoeiro. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 10(3), 327-338.
- Mengel, K., & Kirby, E. A. (2000). Fosforo. In: K. Mengel, & E. A. Kirkby (Eds.). *Principios de Nutrición Vegetal* (4^{ta} ed.). (pp. 355-376). Basel, Suiza: Instituto Internacional de la Potasa.
- Minitab (2017). *Minitab Statistical Software User's Guide. Version 18.1*. State College, PA, USA: Minitab Inc.
- Moréis, P. (1983). A century of Kjeldahl. *Journal of the Association of Public Analysts*, 21, 53-58.
- Murugan, R., Swaminathan, C., Niemsdorff, P., & Karthikeyan, N. (2011). Effects of combined application of biofertilisers with neem cake on soil fertility, grain yield and protein content of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper). *World Journal of Agricultural Sciences* 7(5), 583-590.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Slack, D. C., & Carrillo, M. (2004) Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree-day concept: application to a potato crop. *Irrigation Drainage*, 53(3), 251-261.
- Peres-Sorato, R., Mazzetti-Fernandes, A., Andriani dos Santos, L., & Gomes-Job, A. L. (2013). Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1027-1042.
- Prakash, J., & Arora, N. K. (2019). Phosphate-solubilizing *Bacillus* sp. enhances growth, phosphorus uptake and oil yield of *Mentha arvensis* L. *3 Biotech*, 9(4), 126. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1660-5>
- Puentes-Páramo, Y. J., Menjivar-Flores, J. C., Gómez-Carabalí, A., & Aranzazu-Hernández, F. (2014). Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica*, 63(2), 145-52.
- Rodríguez-de Luque, J. J., & Creamer, B. (2014). Major constraints and trends for common bean production and commercialization; establishing priorities for future research. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 423-431.
- Ruelas-Islas J. R., Reyes-Olivas, A., Núñez-Ramírez, F., Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2018). Effect of phosphorus rates and *Bacillus subtilis* on growth, dry matter production and yield of common Bean in Sinaloa México. *International Journal of Agriculture and Biology*, 20(8), 1818-1824.
- Sakil-Munna, M., Tahera, J., Mohibul-Hassan Afrad, M., Nur, I. T., & Noor, R. (2015). Survival of *Bacillus* spp. SUBB01 at high temperatures and a preliminary assessment of its ability to protect heat-stressed *Escherichia coli* cells. *BMC Research Notes*, 8, 637. <https://doi.org/10.1186/s13104-015-1631-9>
- Salinas-Pérez, R. A., Rodríguez-Cota, F. G., Padilla-Valenzuela, I., Valencia-Martínez, Y., Ortiz-Cano, H. G., & Acosta-Gallegos, J. A. (2012). Janasa, nueva variedad de frijol tipo azufrado para el estado de Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 397-402.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). *Producción Agrícola*. Consultado el 20 de febrero, 2020, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.
- Sifuentes, I. E., Quintana-Quiroz J. G., Macías-Cervantes. J., & González-Calderon, V. M. (2012). *IrriModel 1.0: Programación integral y gestión del riego a través de internet*. Sinaloa, México: INIFAP-CIRNO-CEVAF.
- Simpson, R. J., Oberson, A., Culvenor, R. A., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., ... Ricardson, A. E. (2011). Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil*, 349, 1-32. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0880-1>
- Singh-Meena, V., Maurya, B. R., & Verma, J. P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? *Microbiological Research*, 169, 337-347.
- Singh, M. V., Maurya, B. R., Meena, S. K., Meena, R. K., Kumar, A., Verma, J. P., & Singh, N. P. (2016). Can *Bacillus* species enhance nutrient availability in agricultural soils? In M. T. Islam, M. Rahman, P. Pandey, C. K. Jha, & A. Aeron (Eds.). *Bacilli and biotechnology* (pp. 362-354). Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_16
- Singh, A. V., Prasad, B., & Goel, R. (2018). Plant growth promoting efficiency of phosphate solubilizing *Chryseobacterium* sp. PSR 10 with different doses of N and P fertilizers on lentil (*Lens culinaris* var. PL-5) growth and yield. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(5), 2280-2289.
- Solanki, M. K., Singh, R. K., Srivastava, S., Kumar, S., Kashyap, P. L., Srivastava, A. K., & Arora, D. K (2014). Isolation and characterization of siderophore producing antagonistic rhizobacteria against Rhizoctonia solani. *Journal of Basic Microbiology*, 54(6), 585-597.
- Swain, M. R., Laxminarayana, K., & Ray, R. C. (2012). Phosphorus solubilization by thermotolerant *Bacillus subtilis* isolated from cow dung microflora. *Agricultural Research*, 1, 273-279. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0022-x>
- Terán, H., Lema, M., Webster, D., & Singh, S. P. (2009). 75 Years of breeding pinto bean for resistance to diseases in the United States. *Euphytica* 167(3), 341-351. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9892-9>
- Turuko, M., & Mohammed, A. (2014). Effect of different phosphorus fertilizer rates on growth, dry matter, yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *World Journal of Agricultural Research*, 2(3), 88-92.
- Urzúa, H. (2005). Beneficios de la fijación simbiótica de nitrógeno en Chile. *Ciencia e Investigación Agraria: Revista Latinoamericana de Ciencias de la Agricultura*, 32(2), 133-150.
- Veresoglou, S. D., Mamolos, A. P., Thornton, B., Voulgari, O. K., Sen, R., & Veresoglou, D. S. (2011). Medium-term fertilization of grassland plant communities masks plant species-linked effects on soil microbial community structure. *Plant Soil*, 344, 187-196. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0739-5>
- Whiters, P. J. A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D. L., Healey, J. R., & Talboys, P. J. (2014). Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science and Technology*, 48, 6523-6530.
- Wong-González, E. (2010). ¿Después de un análisis de varianza qué?... Ejemplos en ciencia de alimentos. *Agronomía Mesoamericana*, 21(2), 349-356.
- Yao, A. V., Bochow, H., Karimov, S., Boturov, U., Sanginboy, S., & Sharipov, A. K. (2006). Effect of FZB 241 *Bacillus subtilis* as a biofertilizer on cotton yields in field tests. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 39(4), 1-6.
- Zaidi, S., Usmani, S., Singh, B. R., & Musarrat, J. (2006). Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere* 64(6), 991-997. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.057>