



Article Original

Nutritional efficiency of bocashi with phosphate rock and microbial consortia in potato (*Solanum tuberosum*)

Eficiencia Nutricional del Bocashi con roca fosfórica y consorcios microbianos en papa (*Solanum tuberosum*)

César Chumacero Vásquez^{1*} · Rogelio Canaviri Colque¹ · Marco A. Villagomez Ramírez² · Marcial Plaza Santos¹ · Wilson Siñaniz²

¹ Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera Ingeniería Agronómica, Llallagua, Bolivia

² Universidad Nacional "Siglo XX", Dirección General de Investigación, Llallagua, Bolivia

* Autor de correspondencia: cesarchumacerovasquez@gmail.com

Received: 21 July 2025. Accepted: 21 October 2025. Published: 20 December 2025.

Abstract

This study evaluated nutrient use efficiency in potato (*Solanum tuberosum*) cultivation using Bocashi enriched with phosphate rock and microbial consortia solubilizing phosphorus and potassium. A balanced Lattice experimental design was implemented with nine treatments, considering three potato varieties (Desire, Waych'a, and Pucawaych'a) and three levels of phosphate rock application (5% without microbial consortia, 5% with microbial consortia, and 10% with microbial consortia). Results indicated that the Desire variety exhibited the highest nutrient absorption efficiency, with efficiency coefficients of 103.26% for nitrogen, 72.87% for phosphorus, and 144.51% for potassium, compared to the Waych'a and Pucawaych'a varieties, which showed lower values. It was determined that the application of 10% phosphate rock did not significantly improve phosphorus solubilization, suggesting a saturation threshold. Additionally, microbial consortia enhanced nutrient bioavailability and crop yield, reducing dependency on synthetic fertilizers. The combination of Bocashi with efficient microorganisms represents a sustainable alternative to optimize soil fertility, improve nutrient efficiency, and increase agricultural productivity while reducing environmental impact. This approach supports the development of agroecological strategies for regenerative agriculture in degraded soils.

Keywords: Agroecological strategies; biofertilizers; solubilizing phosphorus; regenerative agricultura.

Resumen

El presente estudio evaluó la eficiencia en el uso de nutrientes en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), empleando Bocashi enriquecido con roca fosfórica y consorcios microbianos solubilizadores de fósforo y potasio. Se utilizó un diseño experimental Lattice balanceado con nueve tratamientos, considerando tres variedades de papa (Desire, Waych'a y Pucawaych'a) y tres niveles de aplicación de roca fosfórica (5% sin consorcios microbianos, 5% con consorcios microbianos y 10% con consorcios microbianos). Los resultados indicaron que la variedad Desire presentó la mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, con coeficientes de eficiencia de 98,70 % para nitrógeno, 69,65 % para fósforo y 138,13 % para potasio, en comparación con Waych'a y Pucawaych'a, que mostraron valores más bajos. Se determinó que la aplicación del 10% de roca fosfórica no mejoró significativamente la solubilización del fósforo, sugiriendo un umbral de saturación del nutriente. Además, el uso de consorcios microbianos potenció la biodisponibilidad de los nutrientes y el rendimiento del cultivo, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos. La combinación de Bocashi con microorganismos eficientes se presenta como una alternativa sostenible para optimizar la fertilidad del suelo, mejorar la eficiencia nutricional y aumentar la productividad agrícola, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental. Este enfoque permite desarrollar estrategias agroecológicas para una agricultura regenerativa en suelos degradados.

Palabras clave: Agricultura regenerativa; biofertilizantes; estrategias agroecológicas; solubilización fosforo.

Introducción

El fósforo (P) y el potasio (K) son macronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, ya que intervienen en procesos clave como la transferencia de energía, la fotosíntesis y la resistencia al estrés abiótico (Bouizgarne et al., 2023; Li et al., 2020). No obstante, en muchos suelos agrícolas, el P se encuentra fijado en formas no disponibles para las plantas, mientras que la disponibilidad de K disminuye debido a la lixiviación y la fijación mineral (Xiao et al., 2018; Magallon-Servín et al., 2020). En el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), la deficiencia de estos nutrientes impacta negativamente el crecimiento radicular, la floración y la producción de tubérculos (Murillo-Amador et al., 2019).

En los suelos del norte de Potosí, la baja disponibilidad de P y K limita la productividad de la papa debido a la alcalinidad, la erosión y la ausencia de microorganismos solubilizadores (Kumar & Gaiind, 2019). A esto se suma el uso excesivo de fertilizantes químicos, que ha degradado la microbiota del suelo, así como la expansión agrícola sin planificación, el sobrepastoreo y la falta de estrategias de conservación, factores que han acelerado su deterioro (Burni et al., 2023; Blanco & Reyes, 2018). Además, las condiciones climáticas adversas, como sequías, heladas y granizadas, afectan la absorción de nutrientes y reducen la productividad (Magallon-Servín et al., 2020).

Para contrarrestar la baja disponibilidad de fósforo (P) y potasio (K) en suelos agrícolas, una alternativa sostenible es el uso de biofertilizantes tipo Bocashi, enriquecidos con roca fosfórica y microorganismos solubilizadores (Sun et al., 2021; Allende et al., 2021). El empleo de consorcios como Bio Bull (*bacterias lácticas*), Biozera (*Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis*) y Bacterial Mix ha demostrado mejorar la disponibilidad de P y K (Beltrán, 2014; Osorno Bedoya, 2013). Estos microorganismos producen ácidos orgánicos que disuelven fosfatos minerales y movilizan potasio intercambiable (Díaz et al., 2016; Navarro, 2021). Además, *Bacillus* spp. y *Trichoderma* spp. contribuyen al crecimiento radicular y a la resistencia al estrés, favoreciendo la eficiencia nutricional y el rendimiento del cultivo (Valero et al., 2014; Nostoc, 2022).

En este contexto, la aplicación de microorganismos solubilizadores de fosfatos se presenta como una estrategia biotecnológica viable y ecológica para mejorar la disponibilidad de P en suelos degradados (Sun et al., 2021). Estudios recientes han demostrado que microorganismos como *Bacillus* y *Trichoderma* liberan ácidos orgánicos y enzimas que transforman el P insoluble en formas biodisponibles (Xiao et al., 2018). Asimismo, la inoculación con estas bacterias puede incrementar la solubilización de P hasta en un 40%, lo que impacta positivamente en el crecimiento de los cultivos y la eficiencia del uso de nutrientes (Magallon-Servín et al., 2020).

Por tanto, el estudio evaluó el efecto del Bocashi enriquecido con roca fosfórica y consorcios microbianos en la eficiencia del uso de fósforo (P) y potasio (K) en tres variedades de papa: Desire, Waych'a y Pucawaych'a. Determinando la solubilización de estos nutrientes en los suelos tratados, analizando su absorción y rendimiento en las plantas, y se comparó la eficiencia del biofertilizante con los métodos convencionales. La pregunta de investigación fue: ¿Cómo influyó la aplicación de Bocashi enriquecido con roca fosfórica y microorganismos en la solubilización de P y K y en el rendimiento del cultivo de papa? Así mismo, los resultados permitieron optimizar la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos en la región, contribuyendo así a una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Materiales y Métodos

Ubicación del estudio

El presente estudio se realizó en el Centro de Investigación y Producción Agroecología Caripuyo (CIPAC), dependiente de la carrera de Ingeniería Agronómica, sub sede Caripuyo de la Universidad Nacional Siglo XX (UNS XX), entre las coordenadas 18°23'30"S y 66°47'30"O, a 3.380 m s. n. m. La región presenta un clima frío-seco, con precipitaciones anuales entre 400 y 600 mm y una temperatura media de 12°C. Los suelos son franco-arenosos, con baja retención de humedad y escasa disponibilidad de nutrientes como fósforo y nitrógeno, lo que limita su fertilidad. Esta situación afecta la productividad agrícola, por lo que es necesaria la aplicación de biofertilizantes enriquecidos con roca fosfórica y microorganismos eficientes para mejorar la calidad del suelo y la producción.

Diseño Experimental

Se implementó un diseño experimental Lattice balanceado, con 9 tratamientos, considerando tres variedades de papa (Desire, Waych'a y Pucawaych'a) y tres niveles de roca fosfórica (5 % sin consorcio microbiano, 5 % con consorcio microbiano y 10 % con consorcio microbiano).

El consorcio microbiano (C.M.) incluye a Biozera: (*Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*) y a Bacterial Mix (B.M.): (*Bacillus pumilus*, *B. amyloliquefaciens*, *B. megaterium*, *B. lechiniiformes*, *B. laterosporus* y *B. subtilis*). Los tratamientos (**Tabla 1**) combinan tres variedades de papa (Desire, Waych'a y Pucawaych'a) con tres niveles de roca fosfórica (5% y 10%, con y sin Bacterial Mix (B.M.)), que incluye *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y géneros de *Bacillus*. Las variables independientes son las variedades de papa y los niveles de roca fosfórica, con y sin Bacterial Mix. Las variables dependientes incluyen la solubilización del fósforo y potasio, la fertilidad del suelo (pH, nitrógeno y potasio) y el rendimiento del cultivo, evaluados mediante métodos analíticos (**Tabla 2**).

Aplicación del Bocashi

Se estableció una dosis de 10 toneladas por hectárea de Bocashi, basada en los valores de aporte de nutrientes obtenidos en los ensayos de laboratorio. La **Tabla 4** presenta los aportes nutricionales del Bocashi del "CIPAC", donde se observa que a una dosis de 10 toneladas por hectárea se incorporan 202,60 kg/ha de N, 180,91 kg/ha de P2O5 y 57,87 kg/ha de K2O.

Tabla 1. Tratamientos y sus características de combinación

Variable	Tratamiento	Factorial
Desire	T1	Bocashi enriquecido con roca fosfórica (R.F.) (5%) + Bio Bull
	T2	Bocashi enriquecido con R.F. (5%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.
	T3	Bocashi enriquecido con R.F. (10%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.
Waych'a	T4	Bocashi enriquecido con R.F. (5%) + Bio Bull.
	T5	Bocashi enriquecido con R.F.(5%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.
	T6	Bocashi enriquecido con R.F.(10%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.
Pucawaych'a	T7	Bocashi enriquecido con R.F. (5%) + Bio Bull.
	T8	Bocashi enriquecido con R.F. (5%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.
	T9	Bocashi enriquecido con R.F. (10%) + Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix.

Tabla 2. Variables de estudio y métodos de evaluación

Tipo	Variable	Indicadores	Método de Evaluación
Independiente	Variedades de papa	Desire, Waych'a, Pucawaych'a	Diseño Lattice balanceado con 9 tratamientos
	Niveles de R.F. con C.M.	5% R.F. con Bio Bull , 5% Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix, 10% Bio Bull + Biozera + Bacterial Mix	
Dependiente	Solubilización del fósforo y potasio	Fósforo total en (%), Fósforo disponible en (Kg/Tn), Potasio total, Potasio asimilable	Método Bray I para P. y espectrofotometría de emisión atómica para K
	Fertilidad del suelo	pH, N total, N asimilable, K disponible	Análisis químico de suelo
	Rendimiento del cultivo	tn/ha, coeficiente de eficiencia	Análítica

Tabla 3. Aportes nutricionales del bocashi del "CIPAC"

Descripción	N kg/ha	P2O5 kg/ha	K2O kg/ha
Bocashi 100 kilos	2,03	1,81	0,58
Bocashi 1 tn/ha	20,26	18,09	5,79
bocashi 5 tn/ha	101,30	90,46	28,94
Bocashi 10 tn/ha	202,60	180,91	57,87

Análisis de Datos

Para evaluar los efectos del Bocashi enriquecido con roca fosfórica y consorcios microbianos en la eficiencia de los nutrientes y el rendimiento del cultivo de papa, se utilizó estadística inferencial basada en modelos de análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias. Se realizó un ANOVA de clasificación múltiple, considerando el diseño experimental Lattice balanceado con 9 tratamientos. Se evaluaron los efectos principales y la interacción entre los factores: (1) Variedad de papa (Desire, Waych'a y Pucawaych'a) y (2) Nivel de roca fosfórica (5% sin C.M., 5% con C.M. y 10% con C.M.). El análisis permitió identificar diferencias significativas en la solubilización de nutrientes, crecimiento y rendimiento del cultivo. En los casos de significancia estadística ($p < 0.05$), se aplicaron pruebas post hoc, específicamente la prueba de Duncan, para determinar qué tratamientos presentaban diferencias relevantes dentro de cada factor.

Asimismo, se calculó el Coeficiente de Eficiencia de los Nutrientes (CEN) utilizando la fórmula: Coef. de Eficiencia (%) = Nutrientes aprovechados x 100 / Nutrientes totales. Los "Nutrientes aprovechados" se calcularon en función del rendimiento de las parcelas con Bocashi y roca fosfórica, mientras que los "Nutrientes totales" se basaron en la oferta teórica, considerando los nutrientes disponibles en el suelo y los aportados por los 10 tn de Bocashi. Los análisis de datos se realizaron en Infostat, para calcular la eficiencia nutricional.

Resultados

Macronutrientes del Bocashi

Se presentan los resultados del contenido de macronutrientes (calcio, magnesio, potasio, nitrógeno y fósforo) obtenidos de las cuatro muestras de Bocashi (**Tabla 4**). El análisis de laboratorio, evidenció diferencias significativas en el contenido de macronutrientes entre los tratamientos evaluados. El pH varió entre 7.20 y 8.90, con un promedio de 8.33 en los tratamientos con roca fosfórica y consorcios microbianos. El calcio total aumentó con la roca fosfórica, alcanzando hasta 2.60 kg/tn, mientras que el magnesio se mantuvo estable entre 0.36 y 0.39 kg/tn. El potasio fue mayor en el control (5.79 kg/tn) y disminuyó con la roca fosfórica (mínimo de 0.22 kg/tn). El nitrógeno total se duplicó con los consorcios microbianos, llegando hasta 20.50 kg/tn, y el fósforo alcanzó un máximo de 18.03 kg/tn en los tratamientos con roca fosfórica, en contraste con los 2.01 kg/tn del control, es decir 9 veces más del normal.

Efectos de tratamiento en variedades de papa

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los factores evaluados, con un coeficiente de determinación ajustado (R^2 Aj) de 0,86 y un coeficiente de variación del 12,75%. El efecto de la variedad (Factor A) fue altamente significativo ($p < 0,0001$), explicando la mayor proporción de la variabilidad observada. Del mismo modo, el bioinsumo (Factor B) tuvo un efecto significativo ($p = 0,0002$), mientras que la interacción entre ambos factores también fue significativa ($p = 0,0100$), indicando que la respuesta de cada variedad depende del tratamiento con bioinsumo.

Rendimiento de variedades (Factor A) y efecto bioinsumo (Factor B)

El análisis con el Test de Duncan (**Figura 1A**) muestra que la variedad Desire obtuvo el mayor rendimiento promedio (57,35 tn/ha), formando un grupo estadístico independiente (A). La variedad Pucawaych'a alcanzó valores intermedios (39,21 tn/ha), clasificándose en el grupo B, mientras que Waych'a presentó el menor rendimiento (30,14 tn/ha), ubicándose en el grupo C. Estos resultados indican que la elección varietal influye significativamente en la eficiencia de aprovechamiento de los nutrientes aportados por el biofertilizante.

Tabla 4. Contenido de nutrientes en kg/tn de Bocashi

Nutriente	0% R.F. sin C.M.	5% R.F. sin C.M.	5% R.F. con C.M.	10% R.F. con C.M.	Promedio (kg/tn)
pH (1:5)	7,2	8,88	8,35	8,9	8,33
Calcio total	1,80	2,60	2,60	2,40	2,53
Magnesio total	0,20	0,37	0,39	0,36	0,37
Potasio total	5,79	0,36	0,29	0,22	0,29
Nitrógeno total	10,40	20,50	20,20	20,10	17,80
Fósforo total	2,01	18,01	18,01	18,03	13,52

Tabla 5. Análisis de varianza para variedad y bioinsumo en el rendimiento de papa

(F.V.)	(SC)	gl	(CM)	F	p-valor
Modelo	4839,57	8	604,95	20,86	<0,0001
Factor A (Variedad)	3456,15	2	1728,08	59,60	<0,0001
Factor B (Bioinsumo)	852,58	2	426,29	14,70	0,0002
Interacción A x B	530,83	4	132,71	4,58	0,0100
Error	521,90	18	28,99		
Total	5361,47	26			

El análisis estadístico indica diferencias significativas ($p = 0,0002$), confirmando que el uso de roca fosfórica con bioinsumos influye en la absorción de nutrientes y el rendimiento del cultivo (**Figura 1B**). El tratamiento con 5% R.F. con B.M. obtuvo el mayor rendimiento (48,97 tn/ha, Grupo A), seguido por 10% R.F. con B.M. (42,52 tn/ha, Grupo B). En contraste, el tratamiento 5% R.F. sin B.M. mostró el menor rendimiento (35,21 tn/ha, Grupo C). Esto demuestra que la incorporación de consorcios microbianos mejora significativamente la disponibilidad y absorción de nutrientes en el cultivo de papa.

Combinaciones de variedades y bioinsumos

La **Figura 2**, muestra la interacción entre las variedades de papa y los bioinsumos, destacando diferencias significativas en el rendimiento. La combinación de Desire con 5% R.F. y B.M. obtuvo el mejor rendimiento (67,79 tn/ha), colocándose en el grupo A, seguida por Desire con 10% R.F. y B.M. (61,57 tn/ha, grupo A). Pucawaych'a con 5% R.F. y B.M. alcanzó un rendimiento de 43,39 tn/ha, ubicándose en el grupo B. En contraste, Waych'a con 10% R.F. y B.M. mostró el rendimiento más bajo (24,79 tn/ha, grupo E). Estos resultados sugieren que la efectividad de los biofertilizantes varía según la variedad de papa, lo que resalta la necesidad de enfoques diferenciados para optimizar el rendimiento según las características genéticas del cultivo.

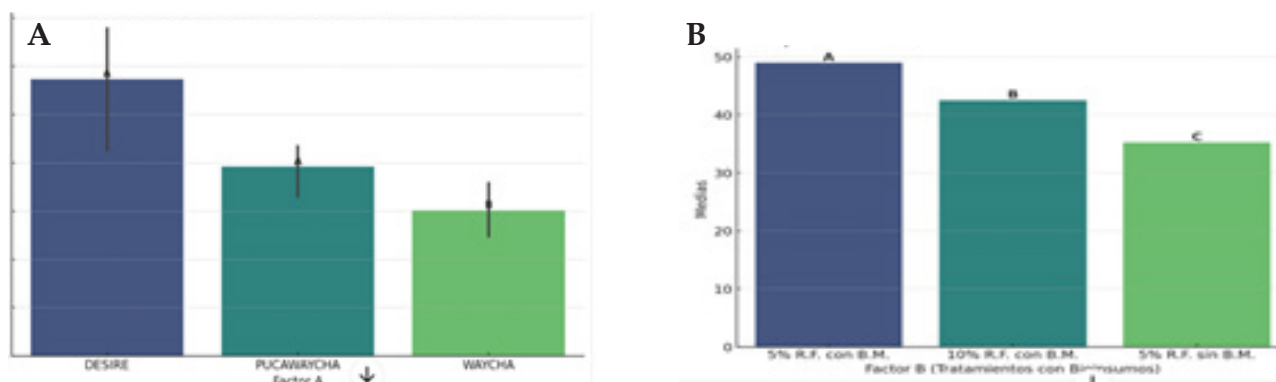


Figura 1. Influencia de la variedad y el bioinsumo en el rendimiento del cultivo de papa: (A) Rendimiento de las variedades, destacando la importancia de la elección varietal en la eficiencia de aprovechamiento de nutrientes. (B) Efecto de los bioinsumos, mostrando que la incorporación de esta mejora significativamente la absorción de nutrientes.

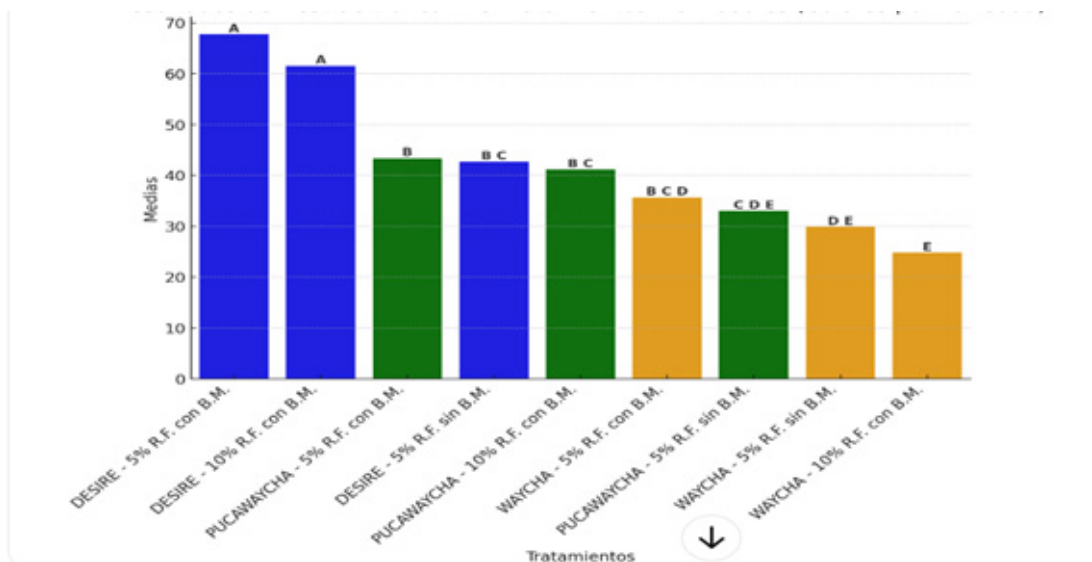


Figura 2. Discriminación de medias de 9 tratamientos y variedades de papa

Eficiencia de los Nutrientes del bocashi

El análisis de los aportes de nutrientes del suelo y el bioinsumo BOCASHI (Tabla 6) muestra que, al adicionar 10 tn/ha de BOCASHI, los nutrientes aumentan considerablemente (N: 202,60 kg/ha, P2O5: 180,91 kg/ha, K2O: 57,87 kg/ha). Esto eleva los nutrientes totales a 261,48 kg/ha de N, 230,56 kg/ha de P2O5 y 269,87 kg/ha de K2O. Sabiendo que los coeficiente de eficiencia teóricos son (40% para N; 35% para P2O5 y 35% para K2O).

Las nuevas eficiencias encontradas con el estudio, destacan a la variedad Desire con el 98,70% para el Nitrógeno (N): el Fósforo (P₂O₅) con 69,65% y el Potasio (K₂O) con 138,13%. En resumen, se puede afirmar que los microorganismos solubilizadores de P y K, contribuyen en la fertilidad del suelo. Estos resultados indican que la variedad Desire presenta una alta capacidad de absorción de los nutrientes aplicados, lo que sugiere una respuesta muy eficiente a la fertilización con Bocashi. En las variedades Pucawaych'a y Waych'a son así: En Pucawaych'a, la eficiencia es un poco menor, ya que su promedio de rendimiento es de 39.21 t/ha. (eficiencia es 67,48%, 47,62% y 94,44% para N, P y K respectivamente). En Waych'a el coeficiente de eficiencia es 51,87%, 36,60% y 72,59 para N, P, y K respectivamente, ya que su máximo rendimiento es de 30,14 tn/ha).

Tabla 6. Planificación de rendimiento en el cultivo de papa variedad Desire

Descripción	N (kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	K2O (kg/ha)
Aporte del suelo (a)	58,88	49,65	212,00
Aportes de 10 tn/ha de bocashi (b)	202,60	180,91	57,87
Nutrientes totales (c = a + b)	261,48	230,56	269,87
Coefficiente de eficiencia teórico (d)	0,40	0,35	0,35
Aporte teórico (c * d)	104,59	80,70	94,45
Planificación de rend. 25 tn/ha (e)	112,50	70,00	162,50
Rend. promedio obs. 57,35 tn/ha desire (f)	258,08	160,58	372,78
Nuevo coeficiente desire (%) (f/c *100)	98,70	69,65	138,13
Rend. Obs. 39.21 tn/ha pucawaych'a (g)	202,50	126,00	292,50
Nuevo coeficiente pucawaych'a (%) (g/c *100)	67,48	47,62	94,44
Rend. promedio obs. 30.14 tn/ha waych'a (h)	157,50	98,00	227,50
Nuevo coeficiente waych'a (%) (h/c*100)	51,87	36,60	72,59

Discusión

El incremento en el pH observado en los tratamientos con roca fosfórica concuerda con estudios previos, que indican que la liberación de fosfatos de calcio tiende a aumentar la alcalinidad del sustrato (Sun et al., 2021). Este fenómeno podría estar relacionado con la actividad de los microorganismos solubilizadores de fósforo, que modifican el ambiente del sustrato mediante la producción de metabolitos ácidos y básicos, lo que regula el pH del medio (Xiao et al., 2018). De esta forma, la interacción entre roca fosfórica y microorganismos parece tener un impacto considerable en el equilibrio ácido-base del suelo, lo cual influye en la disponibilidad de nutrientes.

En relación con el contenido de calcio, se observó un incremento significativo en los tratamientos con roca fosfórica, lo que era esperado dada la composición mineralógica de este insumo. Investigaciones anteriores han mostrado que la roca fosfórica natural, al ser una fuente de calcio y fósforo de liberación lenta, contribuye gradualmente a mejorar la fertilidad del suelo sin causar picos repentinos en la disponibilidad de estos nutrientes (Blanco & Reyes, 2018). Este tipo de liberación controlada resulta beneficioso para mantener un suministro constante de nutrientes esenciales durante el ciclo del cultivo.

Respecto al potasio, se observó una disminución en su contenido en los tratamientos con roca fosfórica, lo que sugiere una posible competencia iónica entre el potasio y los fosfatos en la solución del suelo. Este fenómeno ha sido documentado en estudios previos, que evidencian que la adición de fuentes minerales de fósforo puede alterar la absorción de cationes esenciales como K⁺ y Mg²⁺, afectando su biodisponibilidad (Magallon-Servín et al., 2020). Este hallazgo subraya la importancia de considerar las interacciones iónicas cuando se aplican fertilizantes minerales, para evitar interferencias que disminuyan la disponibilidad de nutrientes clave.

En cuanto al nitrógeno, los resultados revelaron que la inoculación con microorganismos eficientes y la adición de roca fosfórica favorecieron una mayor disponibilidad de este nutriente en los tratamientos enriquecidos. La presencia de Bacillus spp. y Trichoderma harzianum en los tratamientos con Bacterial Mix probablemente estimuló la mineralización de la materia orgánica, promoviendo la liberación progresiva de nitrógeno (Burni et al., 2023). Además, estudios previos han indicado que los consorcios microbianos mejoran la fijación biológica del nitrógeno, optimizando su incorporación en los biofertilizantes (Kumar & Gaiind, 2019). Este proceso destaca la relevancia de los microorganismos en la optimización de los recursos nutritivos disponibles en el suelo.

Finalmente, en relación con el fósforo, el contenido total en los tratamientos enriquecidos con roca fosfórica mostró un incremento significativo respecto al control, confirmando su capacidad para actuar como fuente estable de fósforo a largo plazo. Sin embargo, se observó que a partir del 10% de adición de roca fosfórica, la solubilización del fósforo no aumentó de manera significativa. Este comportamiento sugiere que existe un umbral de saturación a partir del cual la bioacumulación microbiana no incrementa de manera relevante la disponibilidad de fósforo en el medio (Li et al., 2020). Así, la aplicación excesiva de roca fosfórica podría no ser beneficiosa y, en algunos casos, resultar innecesaria.

Los resultados obtenidos en el coeficiente de eficiencia de los nutrientes (CEN) mostraron diferencias significativas entre las variedades y tratamientos. La variedad Desire presentó los valores más altos de eficiencia en nitrógeno (98,70%), fósforo (69,65%) y potasio (138,13%), lo que sugiere que los microorganismos solubilizadores de estos nutrientes continúan optimizando su absorción. En cambio, las variedades Pucawaych'a y Waych'a mostraron coeficientes de eficiencia menores, lo que podría estar relacionado con sus límites de rendimiento, ya que Waych'a alcanza 35 t/ha y Pucawaych'a 45 t/ha, mientras que Desire llega a 60 t/ha. Este hallazgo respalda estudios previos que indican que la absorción de nutrientes depende de la demanda fisiológica de cada variedad y su potencial de rendimiento (Murillo-Amador et al., 2019).

Conclusiones

La evaluación del efecto del Bocashi enriquecido con roca fosfórica y consorcios microbianos en la eficiencia de fósforo y potasio en tres variedades de papa. Reporta a la variedad Desire con mayor eficiencia en la absorción y rendimiento, mientras que Waych'a y Pucawaych'a necesitaron ajustes en la fertilización. La identificación de umbral de saturación para la solubilización del fósforo, indica el 10% de roca fosfórica no aporta beneficios adicionales. Estos hallazgos evidencian que el uso de Bocashi puede mejorar la fertilidad del suelo, reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y promover una agricultura más sostenible.

Declaracion de conflictos

Los autores no tenemos conflictos de interés con respecto a la publicación

Contribuciones de los autores

Todos los autores colaboraron en misma proporción en la investigación y publicación

Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección General de Investigación de la Universidad Nacional "Siglo XX" y a la Carrera de Agronomía Sede Caripuyo por el apoyo en la investigación e interacción.

Referencias

- Allende, A., Hernández, J., & Martínez, R. (2021). Fertilización biológica, orgánica y mineral reducida en soya (*Glycine max* L.). *Terra Latinoamericana*, 39, 45-58. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/2021>
- Álvarez, P., & Ortega, R. (2019). Efecto del tiempo de maduración y de microorganismos eficientes en la calidad nutricional del Bocashi. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 61(2), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.rlm.2019.02.005>
- Beltrán, P. M. E. (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. Grupo de Investigadores en Gestión Ambiental, Universidad de Boyacá. https://www.uniboyaca.edu.co/sites/default/files/inline-files/solubilizacion_fosfatos.pdf
- Blanco, E. L., & Reyes, I. (2018). Mejora sostenible de la productividad y la calidad de los cultivos mediante el uso de biofertilizantes. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 12(3), 215-225. <https://doi.org/10.1007/s12374-018-0295-6>
- Bouizgarne, B., El-Mazzoudi, E., & Amine, H. (2023). Consorcios microbianos para el mantenimiento de la productividad en sistemas agrícolas sostenibles. *Scopus Database*.
- Burni, T., Hussain, F., Bibi, S., & Ullah, R. (2023). Un enfoque sostenible y efectivo para el procesamiento biológico de fosfatos en la agricultura. *International Journal of Agricultural Sciences*, 15(1), 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijas.2023.01.005>
- Carballo, M. F., Sánchez, R., & Lopez, G. (2017). Efecto de la gallinaza y biosólidos en mezcla con turba europea para producción de plántulas de cucurbitáceas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*.
- Castellanos, L., & Salcedo, J. (2015). Efecto de la aplicación de roca fosfórica y la inoculación con bacterias solubilizadoras de fosfatos sobre el crecimiento del ají (*Capsicum annum*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*.

- Castellanos, L., & Salcedo, J. (2016). Efecto de la cachaza más roca fosfatada enriquecida con microorganismos sobre la disponibilidad, absorción de P y el crecimiento del maíz en dos tipos de suelo. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*.
- Díaz, F., Valenzuela, E., & García, M. (2016). Crecimiento, nutrición y rendimiento de calabacita con fertilizantes biológicos y minerales. *Revista Internacional, Universidad Nacional Autónoma de México*, 32(4), 289-300. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/revinternacional/article/view/2016>
- Duss, M. C. (2022). Prácticas agroecológicas: preparación y uso de Bocashi [Informe técnico]. <https://www.agroecologia.org.bo/documentos/bocashi.pdf>
- Kumar, S., & Gaiind, S. (2019). Co-inoculación con microorganismos solubilizadores de fosfato y su impacto en la disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas. *Agricultural Microbiology Journal*, 7(2), 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.amj.2019.02.003>
- LeBlanc, H. A., & Salazar, S. (2008). Comparación del contenido de nutrientes de Bocashis elaborados con desechos de fincas del trópico húmedo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*.
- Li, L., Chen, R., Zuo, Z., Lv, Z., Yang, Z., Mao, W., Liu, Y., Zhou, Y., Huang, J., & Song, Z. (2020). Gránulos compuestos a base de biomasa con solubilización simultánea de fosfatos para la fertilización agrícola. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(5), 345-360. <https://doi.org/10.1080/10440046.2020.1723756>
- Magallon-Servín, P., Antoun, H., Taktek, S., Bashan, Y., & de-Bashan, L. (2020). Cambios en la microbiota del suelo y el metabolismo inducidos por la aplicación de roca fosfórica y microorganismos solubilizadores de fósforo. *Applied Soil Ecology*, 150, Artículo 103458. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103458>
- Murillo-Amador, B., Ruiz, A., & Lopez, J. (2019). Uso de Bocashi y microorganismos eficaces como alternativa ecológica en cultivos de fresa en zonas áridas. *Revista Internacional de Agricultura Sostenible*, 27(3), 180-192. <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1621234>
- Navarro, A. M. (2021). Desarrollo, estabilidad y eficacia de biofertilizantes para mejora del cultivo de plantas de tomate y maíz [Tesis doctoral, Universidad de Barcelona].
- Nieto, G. J. C. (2021). Uso de biofertilizantes como herramienta para reducir el consumo de fertilizantes sintéticos [Tesis de grado, Universidad de Almería].
- Osorno Bedoya, H. (2013). Microorganismos solubilizadores de fósforo: una alternativa sostenible para la fertilización agrícola. *Revista de Biotecnología Agrícola*, 16(2), 75-85. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/2013>
- Quiroz, M., & Céspedes, C. (2019). Bokashi as an Amendment and Source of Nitrogen in Sustainable Agricultural Systems: a Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 706-721. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00069-9>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Revista Latinoamericana de Microbiología*.
- Sun, X., Shao, C., Chen, L., & Jin, X. (2021). Optimización del tamaño de partícula y la densidad de pulpa en la solubilización microbiana de roca fosfórica. *Soil Science and Plant Nutrition*.
- Xiao, C., Wang, Q., Feng, B., & Xu, G. (2018). Solubilización de roca fosfórica por bacterias promotoras del crecimiento vegetal en suelos agrícolas. *Soil Biology and Biochemistry*.