

Biofertilizantes en la producción de maíz (*Zea mays* L.) de riego en dos condiciones de fertilización

Biofertilizers in irrigated corn (*Zea mays* L.) production under two fertilization conditions

Maximiliano Villagrana-Soto¹ , Alfredo Lara-Herrera² , Héctor Gutiérrez-Bañuelos¹ ,
Francisco Echavarría-Cháirez¹ , Rodolfo de la Rosa-Rodríguez^{3*} , José Roberto González-Hernández⁴ 

¹Unidad Académica de Veterinaria y Zootécnica, Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas – Fresnillo Km 31.5, El Cordovel, CP. 98500. Gral. Enrique Estrada, Zacatecas, México.

²Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 15.5, CP. 98170. Cieneguillas, Zacatecas, México.

³Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas. Ramón López Velarde, 801, centro, CP. 98000. Zacatecas, Zacatecas, México.

⁴Unidad Académica de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Zacatecas. Contabilidad y Administración, S/N, fraccionamiento Progreso, CP. 98066. Zacatecas, Zacatecas, México.

*Autor de correspondencia: rodo9003@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 14 de enero 2025

Aceptado: 08 de enero 2026

RESUMEN. Ante los altos costos de los fertilizantes químicos, se requiere generar alternativas sostenibles, como los biofertilizantes. El objetivo fue evaluar el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) con la inoculación de *Azospirillum brasilense* (A), *Bacillus subtilis* (B) y *Serindipita indica* (S) y las diversas inoculaciones en dos dosis de fertilización química, al 100 y al 70% del requerimiento del cultivo. El ensayo se llevó a cabo en condiciones de campo, en un experimento factorial, el factor microorganismos con ocho niveles y el factor fertilización química con dos niveles, con cuatro repeticiones. En el factor microorganismos el consorcio de dos microorganismos presentaron el mayor incremento del rendimiento, le siguió el consorcio con tres microorganismos. Los pesos de mazorca (PM) y de grano fueron mayores con los consorcios de AB, SA y SAB, los incrementos promedio de las variables respectivas, en relación con el tratamiento testigo fueron de 16.3 y 51.8%. En el factor fertilización, con el nivel del 100% fueron mayores el PM y el peso de 200 granos. Se presentó interacción en el peso de forraje verde, peso de forraje seco con grano y el peso del rastrojo, con el consorcio de SAB y fertilización al 100% las tres variables fueron mayores ($p \leq 0.05$) que con SAB al 70%. Con los consorcios de AB o SA y la fertilización al 70% se incrementaron 270 o 269% las relaciones beneficio-costos, con los consorcios respectivos.

Palabras clave: *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, biofertilizante, consorcio, *Serendipita indica*.

ABSTRACT. Given the high costs of chemical fertilizers, it is necessary to generate sustainable alternatives, such as biofertilizers. The objective was to evaluate corn (*Zea mays* L.) yield with the inoculation of *Azospirillum brasilense* (A), *Bacillus subtilis* (B) and *Serindipita indica* (S) and the different consortia in two doses of chemical fertilization, at 100% and 70% of the crop requirement. The trial was carried out under field conditions, in a factorial experiment, the microorganisms factor with eight levels and the chemical fertilization factor with two levels, with four replications. In the microorganisms factor, consortia with two microorganisms showed the greatest increase, followed by consortia with three microorganisms. Ear weight (BW) and grain weight (GW) were higher with the consortia of AB, SA and SAB, the average increases of the respective variables in relation to the control treatment were 16.3 and 51.8%. In the fertilization factor, with the 100% level, the PM and the weight of 200 grains were higher. There was interaction in green forage weight, dry forage weight with grain and stubble weight, with the consortia of SAB and fertilization at 100% the three variables were higher ($p \leq 0.05$) than with SAB at 70%. With the consortia of AB or SA and 70% fertilization, the highest benefit/cost ratios (BCR) were obtained, the increases with respect to the control were 270 and 269%, respectively.

Keywords: *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, biofertilizer, consortium, *Serendipita indica*.

Como citar: Villagrana-Soto M, Lara-Herrera A, Gutiérrez-Bañuelos H, Echavarría-Cháirez F, de la Rosa-Rodríguez R, González-Hernández JR (2026) Biofertilizantes en la producción de maíz (*Zea mays* L.) de riego en dos condiciones de fertilización. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(1): e4446. DOI: 10.19136/era.a13n1.4446.

INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo de importancia económica a nivel mundial. En México se producen más de 27.5 millones de toneladas de grano de maíz al año, con un rendimiento promedio de 4.28 t ha⁻¹ entre riego y temporal (SIAP 2023). El alto costo de la fertilización del maíz en México reduce la rentabilidad del cultivo (Rodríguez *et al.* 2022) y genera la necesidad de alternativas ecológicas y económicas como la biofertilización, basada en la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (Aguilar-Carpio *et al.* 2022). El maíz tiene alta demanda de nitrógeno (N), y se necesitan alternativas sostenibles para reducir el aporte de fertilizantes químicos (Tilhaqui-Bertasello *et al.* 2021). De esta manera el uso de biofertilizantes puede reducir hasta un 30% el uso de fertilizantes químicos sin afectar el rendimiento, incluso puede llegar a incrementarlo (González-Márquez *et al.* 2021). El uso de bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fosfato y las estimuladoras del crecimiento vegetal, así como los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) favorecen la solubilización y absorción de fósforo, y el aporte de agua a las plantas, pueden complementar a la fertilización química y ser una opción para aumentar el rendimiento, reducir costos de producción y conservar el ambiente (Martínez-Reyes *et al.* 2018, Maçik *et al.* 2020).

Serendipita indica tiene diversas funciones benéficas para los cultivos cuando se emplea como biofertilizante, como inmunomodulador, reduce el estrés biótico y abiótico (Jangir *et al.* 2021). También se ha documentado que el hongo puede aumentar la producción de biomasa y el contenido de clorofila, favoreciendo la eficiencia fotosintética, y en consecuencia el rendimiento de maíz (Noori *et al.* 2023). Al inocular con *A. brasilense*, se incrementa el rendimiento de grano (RG) en maíz de acuerdo a Tilhaqui-Bertasello *et al.* (2021), de igual forma, otros estudios reportan ese mismo efecto con la inoculación de *B. subtilis* (Gutiérrez-Calvo *et al.* 2022). Con la inoculación de *B. subtilis* y *A. brasilense* se incrementó en un 100.5 y 54.6% la eficiencia del uso de fósforo y un 17.4 y 12.8% el rendimiento de grano de maíz, respectivamente (Pereira *et al.* 2020).

A pesar de existir información sobre las bondades de diversos microorganismos en el desarrollo y la producción de maíz, se requiere generar información sobre el efecto de la inoculación de *A. brasilense*, *B. subtilis* y *S. indica*, con la factibilidad de reducir la fertilización química. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de las inoculaciones de *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* y *Serendipita indica* de forma individual y en consorcios, en dos condiciones de fertilización química, una al 100% del requerimiento y otra al 70%, en la producción de maíz de riego y el efecto que se tiene en la economía de la producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y propiedades del suelo

El trabajo experimental se realizó en el campo agrícola del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 167, en Valparaíso, Zacatecas, México; ubicado a 22° 46' N y 103° 34' O, a 1 880 m snm. Previo al experimento existió un cultivo de nopal de temporal durante 10 años. Antes de la siembra, se realizó un muestreo de suelo a 30 cm de profundidad. Los resultados del análisis fueron: pH = 7.26, CE = 0.32 dS m⁻¹, MO = 0.87%, textura = franco-arenosa, CIC = 7.51 meq 100 g⁻¹,

concentraciones en ppm de: N = 7.20, P = 32.0, K = 380, Ca = 980, Mg = 80, S = 30.0, Fe = 14.60, Mn = 7.70, Zn = 0.40, B = 0.66 y Cu = 0.00. De acuerdo con el análisis microbiológico, no hubo presencia de nematodos, bacterias ni hongos fitopatógenos, sólo presencia de *Fusarium* sp. Como benéficos se encontraron bacterias anaeróbicas, aeróbicas y nitrificantes, también *Bacillus* sp., de hongos sólo se detectó la presencia de *Aspergillus* sp., y *Actinomicetos* sp.

Siembra y manejo

La siembra se llevó a cabo el 13 de mayo de 2022 con semilla híbrida DEKALB® DK-4020Y, a una densidad de 80 800 plantas por hectárea. Después de la siembra se aplicó un riego a una tensión de -10 a -15 kPa, la humedad del suelo se determinó con sensor de bloques de yeso de la marca Watermark® a 15, 30 y 45 cm de profundidad. La fertilización al suelo se aplicó el día de la siembra y los fertilizantes solubles durante el desarrollo del cultivo mediante el sistema de riego por goteo, en sincronización con la demanda del cultivo en sus diferentes etapas de desarrollo.

Las fuentes de fertilizantes solubles, las dosis en kg ha⁻¹ y las etapas en las que se aplicaron éstos, fueron las mismas para ambas proporciones (100 y 70%). En la del 100% se aplicaron 280 N - 90 P₂O₅ - 90 K₂O - 20 CaO - 17 MgO - 120 S, más 9.3 kg ha⁻¹ de una mezcla de micronutrientes con los siguientes porcentajes: Fe = 7.5, Mn = 3.7, Zn = 0.6, B = 0.4, Cu = 0.3 y Mo = 0.2. Para la fertilización al 70% se aplicaron dosis de 196 N - 63 P₂O₅ - 63 K₂O - 14 CaO - 12 MgO - 84 S más 6.5 kg ha⁻¹ de los micronutrientes. La fertilización aplicada al suelo al momento de la siembra se realizó con sulfato de amonio (21-00-00+24S), superfosfato de calcio triple (00-46-00+15 CaO) y cloruro de potasio (00-00-60). En la fertilización al 100% se aplicaron 150 kg ha⁻¹ de cada fertilizante, en la fertilización al 70% se aplicaron 105 kg ha⁻¹ de los fertilizantes mencionados. El complemento de los nutrientes se realizó mediante fertilizantes solubles en el sistema de riego.

Tratamientos de biofertilización

Los microorganismos utilizados fueron *A. brasilense*, *B. subtilis* y *S. indica*. Las concentraciones de cada microorganismo fueron de 1x10⁸ UFC mL⁻¹ para las bacterias y de 10 000 esporas mL⁻¹ para el hongo. Los microorganismos se diluyeron 1:167 y de esta dilución se aplicaron 4 285 L⁻¹ por parcela. La aplicación de los biofertilizantes en los tratamientos respectivos se llevó a cabo al momento de la siembra. Los tratamientos evaluados con microorganismos fueron: testigo (T) sin inoculación de microorganismos, *S. indica* + *A. brasilense* + *B. subtilis* (SAB), *S. indica* (S), *A. brasilense* (A), *B. subtilis* (B), *S. indica* + *A. brasilense* (SA), *S. indica* + *B. subtilis* (SB) y *A. brasilense* + *B. subtilis* (AB).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental factorial con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela grande fueron las dosis de fertilización, al 100% y al 70% del requerimiento del cultivo. Dentro de las cuales se evaluaron los tratamientos de biofertilización (parcela chica) aleatorizados en cuatro bloques, con un total de 64 unidades experimentales, 32 en cada dosis de fertilización. Cada parcela constó de tres surcos a doble hilera con espaciamiento de 0.4 m entre ellas y 1.5 m entre cada surco con una longitud de 8 m. La parcela útil correspondió al surco central.

Variables de estudio

Se midieron: diámetro del tallo (DT) en la parte media del primer entrenudo con un vernier digital, altura de la planta (AP) desde el nivel del suelo hasta la punta de la espiga, rendimiento de forraje verde (FV) determinado en seis plantas, estas variables fueron evaluadas en la etapa R4 (grano pastoso). Para determinar el peso de 200 granos (P200), peso de la mazorca (PM), peso del forraje seco con grano (FSG), peso de rastrojo (PR) y el rendimiento de grano (RG), las plantas fueron cosechadas en etapa R6 (grano maduro) y mantenidas en deshidratación natural durante 100 días, el contenido de humedad del grano fue de 14%. Se determinaron los costos de producción de cada tratamiento y los ingresos por venta de cada producto (forraje verde, forraje seco con grano, rastrojo y grano), con estos datos se determinó la relación beneficio-coste (RBC) con base en la metodología reportada por Bankoti *et al.* (2021).

Análisis estadístico

Los tratamientos fueron evaluados como un experimento factorial, los factores fueron los microorganismos con ocho niveles y los niveles de fertilización con 70 y 100%, resultando 16 tratamientos. Los resultados de las variables medidas fueron sometidos a un análisis de varianza acorde al experimento factorial y una prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). Además, se determinó la relación entre las variables y el efecto de las inoculaciones en ambas fertilizaciones, mediante el análisis de componentes principales. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat, versión 2020 (Di-Rienzo *et al.* 2020).

RESULTADOS

El factor microorganismos mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) en las ocho variables evaluadas; en todos los casos, la inoculación o consorcio con los microorganismos incrementó los valores de las variables en comparación con la no inoculación. Los mayores resultados en AP, FV, FSG, PM, P200 y RG se presentaron cuando se inocularon dos o tres microorganismos (Tabla 1); los incrementos con las inoculaciones fueron de 41, 38, 24, 16, 24 y 44%, respectivamente. Los incrementos del RG con los consorcios de AB, SAB y SA, respecto al testigo, fueron de 54.9, 51.3 y 49.2%, respectivamente. El RG fue mayor cuando las inoculaciones se realizaron con *A. brasilense* en combinación con otros microorganismos (AB, SA y SAB). Todos los tratamientos con microorganismos superaron al testigo, con un promedio de 51.8%. Por efecto del factor fertilización, se presentaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en PM y P200, con la fertilización al 100% se incrementaron en 4% (Tabla 2), pero en general, la fertilización no presentó diferencias significativas en la mayoría de las variables ni en el rendimiento del grano.

En la interacción, se presentó diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en las variables: FV, FSG y PR. En los tres casos la interacción consistió en que SAB x 100 fueron mayores que con SAB x 70. Los incrementos fueron de 39, 24 y 51%, respectivamente (Tabla 3). También se observó de forma general que las interacciones entre ambas fertilizaciones y los microorganismos S y A, de forma individual, tuvieron los valores más bajos. La inoculación de los consorcios SA y AB en interacción con fertilización al 70% obtuvieron el mayor rendimiento de grano (RG) con respecto al testigo y a los tres microorganismos inoculados de forma individual.

Tabla 1. Efecto de la inoculación de microorganismos en variables agronómicas y rendimiento del maíz en Valparaíso, Zacatecas, México.

Tratamientos	DT (cm)	AP (m)	FV (t ha ⁻¹)	FSG (t ha ⁻¹)	PM (t ha ⁻¹)	PR (t ha ⁻¹)	P200 (g)	RG (t ha ⁻¹)
Testigo	1.63 ^c	1.69 ^b	58.61 ^d	27.41 ^c	17.46 ^c	9.95 ^c	63.90 ^b	12.10 ^c
SAB	2.58 ^a	2.37 ^a	77.42 ^{bc}	34.96 ^a	20.22 ^a	14.74 ^{ab}	79.33 ^a	18.31 ^a
S	1.76 ^c	1.80 ^b	66.1 ^{bcd}	30.05 ^{bc}	18.00 ^c	12.05 ^{bc}	67.76 ^b	13.73 ^{bc}
A	1.98 ^{bc}	1.91 ^b	63.26 ^{cd}	27.63 ^c	17.90 ^c	9.65 ^c	62.55 ^b	13.41 ^{bc}
B	1.77 ^c	2.37 ^a	93.33 ^a	34.06 ^{ab}	18.13 ^{bc}	15.92 ^a	66.04 ^b	13.67 ^{bc}
SA	2.02 ^{bc}	2.37 ^a	79.41 ^{ab}	32.85 ^{ab}	20.26 ^a	12.59 ^{abc}	80.56 ^a	18.05 ^a
SB	2.32 ^{ab}	2.34 ^a	75.39 ^{bc}	32.9 ^{ab}	19.94 ^{ab}	12.96 ^{abc}	79.53 ^a	14.83 ^b
AB	2.50 ^{ab}	2.42 ^a	92.22 ^a	34.98 ^a	20.47 ^a	14.52 ^{ab}	78.76 ^a	18.74 ^a
DMS	0.54	0.34	14.62	4.39	1.88	3.60	9.48	2.27

DT = Diámetro de tallo, AP = Altura de planta, FV = Forraje verde, FSG = Forraje seco con grano, PM = Peso de mazorcas, PR = Peso de rastrojo, P200 = Peso de 200 granos y RG = Rendimiento de grano, SAB = *S. indica*, *A. brasilense* y *B. subtilis*, S = *S. indica*, A: *A. brasilense*; B = *B. subtilis*, SA = *S. indica* y *A. brasilense*, SB = *S. indica* y *B. subtilis*, AB = *A. brasilense* y *B. subtilis*, DMS = Diferencia mínima significativa. Valores seguidas con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Tabla 2. Efecto de la fertilización con dos niveles en variables agronómicas y rendimiento del maíz en Valparaíso, Zacatecas, México.

Fertilización Química (%)	DT (cm)	AP (m)	FV (t ha ⁻¹)	FSG (t ha ⁻¹)	PM (t ha ⁻¹)	PR (t ha ⁻¹)	P200 (g)	RG (t ha ⁻¹)
70	1.98 ^a	2.10 ^a	74.81 ^a	31.35 ^a	18.68 ^b	12.67 ^a	70.78 ^b	15.37 ^a
100	2.15 ^a	2.21 ^a	76.62 ^a	32.36 ^a	19.43 ^a	12.93 ^a	73.8 ^a	15.34 ^a
DMS	1.17	0.11	4.64	1.39	0.60	1.14	3.01	0.72

DT = Diámetro de tallo, AP = Altura de planta, FV = Forraje verde, FSG = Forraje seco con grano, PM = Peso de mazorcas, PR = Peso de rastrojo, P200 = Peso de 200 granos y RG = Rendimiento de grano, DMS = Diferencia mínima significativa. Valores seguidas con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Derivado del análisis multivariado se encontró que el componente principal uno contribuyó con 71.5% en la explicación de la varianza. Las variables con mayor ponderación fueron FSG, AP, RG y PM, y en el Componente dos: FV y PR, la suma de la varianza total fue de 85.8%. Los resultados obtenidos corroboran los antes presentados mediante análisis de varianza, los tratamientos testigo (T-70 y T-100) y los correspondientes a la inoculación de un microorganismo con ambas fertilizaciones, presentaron menor relación con las variables evaluadas; por el contrario, el RG y las variables que determinan los componentes del rendimiento (FSG, AP, PM y P200) estuvieron fuertemente asociadas con el componente uno, los tratamientos que presentaron mayor efecto en estas variables fueron con los consorcios de microorganismos, en el siguiente orden: SAB-100, AB-70, AB-100, SA-70, SB-100, SA-100, SB-70 y SAB-70. El efecto más importante en las variables medidas fue determinado por el factor microorganismos inoculados, los cuales estuvieron altamente asociados con el componente uno. Todos los tratamientos de microorganismos estuvieron relativamente cercanos con sus correspondientes dosis de fertilización (70 y 100%), sin embargo, el tratamiento con el consorcio de los tres microorganismos (SAB) estuvieron más separados entre las dosis de fertilización, particularmente para las variables FV, FSG y PR (Figura

1), lo cual tiene correspondencia con la interacción significativa entre los factores microorganismo y fertilización en estas tres variables determinada con el análisis de varianza (Tabla 3).

Tabla 3. Interacción entre los Microorganismos y Fertilización química en cultivo de maíz.

Tratamiento	Fertilización Química (%)	FV (t ha ⁻¹)	FSG (t ha ⁻¹)	PR (t ha ⁻¹)	RG (t ha ⁻¹)
Testigo	70	56.90 ^f	27.08 ^{de}	10.13 ^{cd}	11.63 ^e
	100	60.33 ^{ef}	27.73 ^{cde}	9.77 ^{cd}	12.57 ^e
SAB	70	64.68 ^{cdef}	31.16 ^{bcde}	11.72 ^{bcd}	17.16 ^{abc}
	100	90.16 ^{ab}	38.77 ^a	17.77 ^a	19.46 ^a
S	70	61.36 ^{def}	29.73 ^{bcde}	12.44 ^{abcd}	13.1 ^e
	100	70.84 ^{bcdef}	30.36 ^{bcde}	11.66 ^{bcd}	14.35 ^{cde}
A	70	60.52 ^{ef}	25.92 ^e	8.31 ^d	13.48 ^{de}
	100	66.00 ^{cdef}	29.33 ^{bcde}	10.99 ^{cd}	13.33 ^{de}
B	70	99.70 ^a	34.21 ^{abc}	16.98 ^{ab}	14.31 ^{cde}
	100	86.96 ^{abc}	33.9 ^{abcd}	14.86 ^{abc}	13.04 ^e
SA	70	72.98 ^{bcdef}	34.59 ^{abc}	14.56 ^{abc}	19.10 ^a
	100	85.83 ^{abc}	31.1 ^{bcde}	10.61 ^{cd}	16.99 ^{abcd}
SB	70	82.52 ^{abcde}	32.43 ^{abcde}	12.74 ^{abcd}	15.01 ^{bcde}
	100	68.27 ^{bcdef}	33.38 ^{abcd}	13.18 ^{abcd}	14.66 ^{bcde}
AB	70	99.86 ^a	35.65 ^{ab}	14.46 ^{abc}	19.18 ^a
	100	84.59 ^{abcd}	34.32 ^{abc}	14.58 ^{abc}	18.31 ^{ab}
DMS		23.58	7.07	5.80	3.67

FV = Forraje verde, FSG = Forraje seco con grano, PR = Peso de rastrojo y RG = Rendimiento de grano, SAB = *S. indica*, *A. brasilense* y *B. subtilis*, S = *S. indica*, A: *A. brasilense*; B = *B. subtilis*, SA = *S. indica* y *A. brasilense*, SB = *S. indica* y *B. subtilis*, AB = *A. brasilense* y *B. subtilis*, DMS = Diferencia mínima significativa. † Valores seguidas con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

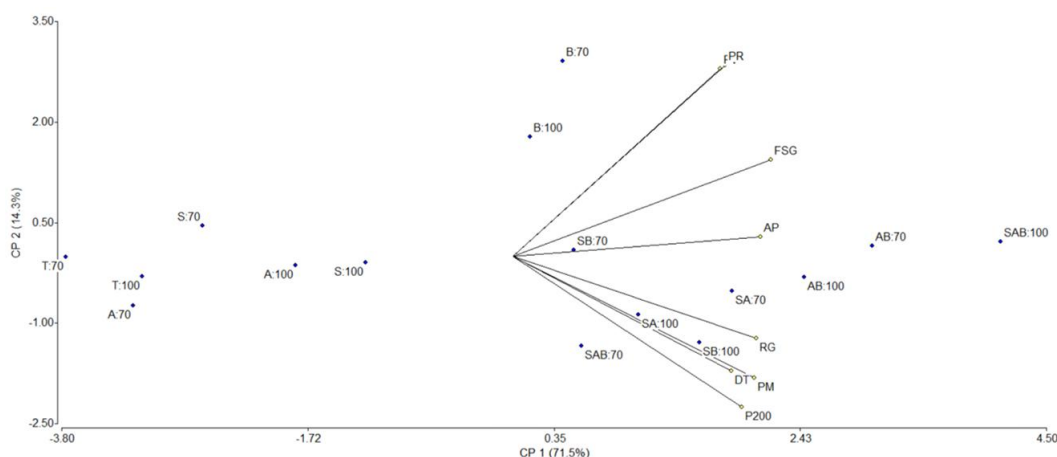


Figura 1. Análisis de componentes principales, del rendimiento y los componentes del rendimiento del cultivo de maíz por efecto de las inoculaciones de microorganismos con dos dosis de fertilización química. T = Testigo, SAB = *S. indica*, *A. brasilense* y *B. subtilis*, S = *S. indica*, A: *A. brasilense*; B = *B. subtilis*, SA = *S. indica* y *A. brasilense*, SB = *S. indica* y *B. subtilis*, AB = *A. brasilense* y *B. subtilis*, 100 = Fertilización al 100%, 70 = Fertilización al 70%, FV = Peso del forraje verde, PR = Peso de rastrojo, FSG = Peso del forraje seco con grano, AP = Altura de planta, RG = Rendimiento de grano, PM = Peso de mazorcas, DT = Diámetro del tallo, P200 = Peso de 200 granos.

El análisis económico indicó diferencias estadísticas entre los tratamientos. Con la inoculación de AB y la fertilización del 70% se tuvo la mayor RBC considerando la producción y venta de FV, FSG y RG. Al contrastarlos con el tratamiento testigo al 100% las RBCs tuvieron un incremento de 454, 164 y 270%, respectivamente. Para el RG, además de la inoculación de AB, también con SA y en ambos casos la fertilización del 70% se tuvieron las mayores RBCs (Tabla 4), el incremento en la RBC de estos tratamientos respecto al tratamiento testigo al 100% de fertilización fue de 270 y 269%, respectivamente.

Tabla 4. Relación beneficio-costo por efecto de la inoculación con microorganismos y dos dosis de fertilización química al cultivo de maíz.

Tratamiento	Fertilización (%)	FV	FSG	RG
TES	70	0.53 ^{cd+}	5.19 ^{cdef}	1.08 ^{efg}
	100	0.37 ^d	4.35 ^f	0.90 ^g
SAB	70	0.74 ^{bcd}	6.12 ^{abcde}	2.08 ^{ab}
	100	1.04 ^{bc}	6.47 ^{abc}	1.94 ^{abc}
S	70	0.65 ^{bcd}	5.79 ^{abcdef}	1.35 ^{cdefg}
	100	0.61 ^{cd}	4.85 ^{cde}	1.17 ^{defg}
A	70	0.63 ^{bcd}	4.92 ^{cdef}	1.42 ^{cdefg}
	100	0.50 ^{cd}	4.65 ^{ef}	1.02 ^{fg}
B	70	1.68 ^a	6.81 ^{ab}	1.56 ^{bcdef}
	100	0.98 ^{bc}	5.53 ^{bcdef}	0.97 ^g
SA	70	0.96 ^{bcd}	6.90 ^{ab}	2.42 ^a
	100	0.95 ^{bcd}	5.00 ^{cdef}	1.57 ^{bcdef}
SB	70	1.22 ^{ab}	6.41 ^{abcd}	1.69 ^{bcde}
	100	0.55 ^{cd}	5.43 ^{bcdef}	1.22 ^{defg}
AB	70	1.68 ^a	7.14 ^a	2.43 ^a
	100	0.92 ^{bcd}	5.62 ^{abcdef}	1.77 ^{bcd}
DMS		0.60	1.58	0.61

TES = Testigo, FV = forraje verde, FSG = forraje seco con grano, RG = rendimiento de grano, SAB = *S. indica*, *A. brasilense* y *B. subtilis*, S = *S. indica*, A: *A. brasilense*; B = *B. subtilis*, SA = *S. indica* y *A. brasilense*, SB = *S. indica* y *B. subtilis*, AB = *A. brasilense* y *B. subtilis*, DMS = Diferencia mínima significativa. + Valores seguidas con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Los resultados encontrados coinciden con Robles y Barea (2004), quienes reportaron un incremento en la biomasa de maíz hasta en 20% producida con el consorcio de *A. brasilense* + *B. subtilis* + *Serendipita* sp. También Ferrarezi *et al.* (2022) reportaron mayor DT de las plantas de maíz al ser tratadas con *A. brasilense* + *B. thuringiensis*; a menudo, estos microorganismos favorecen la disponibilidad de nutrientes. Además, Morales-García *et al.* (2019) atribuyen una mejor respuesta de las plantas a las combinaciones con dos o más bacterias benéficas, gracias a que promueven una

mayor fitoestimulación, debido a los efectos sinérgicos al interactuar entre sí y con la planta en comparación a cuando sólo se inocula con una sola especie. El mayor número de variables modificadas favorablemente fue con los consorcios. SAB y AB incrementaron a las ocho variables, SB a siete y SA a seis de las variables evaluadas. Estos microorganismos favorecen el desarrollo de las plantas gracias a la mitigación del estrés (Sharma *et al.* 2016), solubilización de fosfato y potasio, impulsando la absorción de nutrientes (De-Sousa *et al.* 2021), la fijación de nitrógeno (Zambrano *et al.* 2021), aumentando la capacidad de absorción de agua, el secuestro de sideróforos (Parra-Cota *et al.* 2018) o bien, mejorando la actividad de las enzimas antioxidantes (Islam *et al.* 2016).

De manera general, las co-inoculaciones presentaron mejores beneficios en la producción de maíz que las inoculaciones de cada microorganismo. De acuerdo con Iqbal *et al.* (2017) la co-inoculación de tres bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) como *Azotobacter chroococcum*, *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus megaterium* incrementó la producción de forraje verde de maíz y la calidad del forraje (contenido de proteína y de cenizas), respecto a las inoculaciones simples de cada bacteria y a la no-inoculación. Mientras que Hett *et al.* (2022) con base en la evaluación en el cultivo de trigo de un consorcio microbiano consistente en seis microorganismos también consideran más sostenible la co-inoculación de un consorcio complejo que la inoculación de un microorganismo en específico. De manera individual *B. subtilis* presentó los mejores resultados, debido a que incrementó a cuatro de las variables ensayadas (AP, FV, FSG y PR), estos resultados se atribuyen a las aportaciones que tiene esta especie como BPCV, debido a su capacidad para estimular el crecimiento de raíces mediante la producción de ácido indolacético (AIA), a la fijación de N atmosférico (Rojas *et al.* 2016) y a la solubilización de fosfato (Rodríguez-Hernández *et al.* 2020).

El RG es la variable evaluada que tiene la mayor importancia económica. Las variables que tuvieron mayor correlación con el RG fueron FSG, AP y PM. Todos los tratamientos con las co-inoculaciones, presentaron mayor RG que el tratamiento testigo; los mayores rendimientos se presentaron en los tratamientos en cuya co-inoculación participó *A. brasilense*, este comportamiento del RG también fue reportado por Canizales-Silva *et al.* (2024) con los mismos microorganismos y el mismo material genético de maíz, pero en diferente suelo y en condiciones de invernadero. El mayor incremento del RG respecto al testigo reportado por Canizales-Silva *et al.* (2024) fue de 40% con el consorcio de AB. Estos incrementos en RG son muy superiores a los reportados por Uribe y Dzib (2006), de 7% mediante el consorcio de *A. brasilense* + *Glomus intraradices*; o el reportado por Robles y Barea (2004) de 20% con la co-inoculación de SAB.

El incremento de biomasa de maíz reportado por Hauka (2000) con la co-inoculación de *A. brasilense*, *Bacillus megaterium* y *Glomus macrocarpus*, respecto al testigo fue de 44%. Mientras que Cruz *et al.* (2023) y Lopes-Araujo *et al.* (2023) también reportaron mayor PM, FV, FSG y RG al co-inocular AB, los incrementos del RG respecto al testigo fueron de 33 y 35%, respectivamente. Los resultados de las variables evaluadas y en particular del RG son atribuibles a la buena adaptabilidad de AB y del germoplasma utilizado a las condiciones edafoclimáticas (García-Olivares *et al.* 2007, Müller *et al.* 2015), además Pereira *et al.* (2020) mencionan que la asociación de AB incrementa la absorción de P, beneficiando el desarrollo de los componentes del rendimiento, lo que determina un mayor RG de maíz, esto se corrobora en el presente trabajo con un incremento del 54.9% en RG.

Con excepción de la inoculación de los tres microorganismos (SAB), la cual presentó mayor RG y de forraje (FSG y PR) con la fertilización del 100%, los consorcios de dos microorganismos fueron igual de efectivas en las variables evaluadas con ambas fertilizaciones, por lo cual es más conveniente desde el punto de vista económico inocular AB o SA con la dosis de fertilizantes más baja, con un ahorro del 30% de la fertilización química, las RBC que se obtuvieron mediante estas dos co-inoculaciones y con la fertilización química del 70% fueron de 2.43 y 2.42, las cuales representan un incremento de 270% al inocular con AB y de 269% con SA.

CONCLUSIONES

A. brasilense en consorcio presentó el mayor efecto, en RG respecto al testigo se presentó con AB, el incremento fue de 54.9%, continuó SAB con 51.3% y finalmente SA con 49.2%. *B. subtilis* de forma individual también presentó el mayor efecto en las variables AP, FV, FSG y PR. Con la fertilización utilizada al 100% se incrementó PM y P200. La interacción entre microorganismos y ambas fertilizaciones químicas no mostró diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) por lo que la RBC respecto al testigo se incrementó 270 y 269%, para las fertilizaciones del 70 y 100%, respectivamente. Con la aplicación de estos microorganismos y la menor concentración de fertilizantes químicos se obtuvieron resultados similares a la fertilización química al 100%, lo que resulta una alternativa de producción rentable y sustentable.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores del presente manuscrito declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Carpio C, Arriaga-Rubio LM, Cervantes-Adame YF, Arenas-Julio YR, Escalante-Estrada JAS (2022) Rentabilidad y producción del maíz VS-535 en respuesta a la fertilización química y biológica. *Acta Universitaria* 32: 1-13. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3285>
- Bankoti P, Kumar K, Kumar A (2021) Effect of FYM, bio fertilizers and inorganic manures on growth and yield of maize under irrigated conditions. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 10(1): 2851-2854.
- Canizales-Silva M, Blanco-Macías F, España-Luna MP, De la Rosa-Rodríguez R, Lozano-Gutiérrez J, Lara-Herrera A (2024) Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como complemento a la fertilización química. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(1): 1-9. <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3903>
- Cruz DRC, Silva MA, Nascente AC, de Filippi MCC, Ferreira EPDB (2023) Use of multifunctional microorganisms in corn crop. *Revista Caatinga* 36: 349-361. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n212rc>

- De-Sousa SM, De Oliveira CA, Andrade DL (2021) Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. *Journal of Plant Growth Regulation* 40: 867-877. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10146-9>
- Di-Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW (2020) InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar/>. Fecha de consulta 1 de octubre de 2024.
- Ferrarezi JA, de Carvalho-Estrada PA, Batista BD, Aniceto RM, Tschoeke BAP, Andrade PAM, Lopes BM, Bonatelli ML, Odisi EJ, Azevedo JL, Quecine MC (2022) Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria from the Brazilian Amazon on the bacterial community associated with maize in field. *Applied Soil Ecology* 170: 104-297. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104297>
- García-Olivares JG, Moreno-Medina VR, Rodríguez-Luna IC, Mendoza-Herrera A, Mayek-Pérez N (2007) Efecto de cepas de *Azospirillum brasilense* en el crecimiento y rendimiento de grano del maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3): 305-310.
- González-Márquez LC, Félix-Gastélum R, Sandoval-Romero JA, Escobedo-Urias DC, Longoria-Espinoza RM (2021) Caracterización de biofertilizantes utilizados en el valle agrícola de Guasave, Sinaloa, México. *Terra Latinoamericana* 39: 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.859>
- Gutiérrez-Calvo AE, Gutiérrez-Estrada A, Miceli-Méndez CL, López-Miceli MA (2022) Efectos de *Bacillus subtilis* cepas GBO3 y IN937b en el crecimiento de maíz (*Zea mays* L.). *Polibotánica* 53: 211-218. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.14>
- Hauka FIA (2000) Effect of using single and composite inoculation with *Azospirillum brasilense*, *Bacillus megaterium* var. phosphaticum and *Glomus macrocarpus* for improving growth of *Zea mays*. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology* 25(4): 2327-2338. <https://doi.org/10.21608/JACB.2000.258940>
- Hett J, Neuhooff D, Döring TF, Masoero G, Ercole E, Bevivino A (2022) Effects of multi-species microbial inoculants on early wheat growth and litterbag microbial activity. *Agronomy* 12(4): 1-17. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040899>
- Iqbal A, Iqbal MA, Iqbal A, Aslam Z, Maqsood M, Ahmad Z (2017) Boosting forage yield and quality of maize (*Zea mays* L.) with multi-species bacterial inoculation in Pakistan. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 86: 84-88. <https://doi.org/10.32604/phyton.2017.86.084>
- Islam F, Yasmeen T, Arif MS, Ali S, Ali B, Hameed S (2016) Plant growth promoting bacteria confer salt tolerance in *Vigna radiata* by up-regulating antioxidant defense and biological soil fertility. *Plant Growth Regulator* 80: 23-36. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0142-y>
- Jangir P, Shekhawat PK, Bishnoi A, Ram H, Soni P (2021) Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 116: 101-691. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101691>
- Lopes-Araujo J, Mesquita-Alves J, Carlos-Rocha RHC, Lopes-Santos JZ, dos Santos-Barbosa R, Nacimento-da Costa FM (2023) Beneficial microorganisms affect soil microbiological activity and corn yield under deficit irrigation. *Agriculture* 13(6): 1-19. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061169>
- Maçik M, Gryta A, Frac M (2020) Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in Agronomy* 162: 31-87. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Martínez-Reyes L, Aguilar-Jiménez CE, Carcaño-Montiel MG, Galdámez-Galdámez J, Morales-Cabrera JA, Martínez-Aguilar FB, Llaven-Martínez J, Gómez-Padilla E (2018) Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra* 5(1): 26-37.
- Morales-García YE, Baez A, Quintero-Hernández V, Molina-Romero D, Rivera-Urbalejo AP, Pazos-Rojas LA (2019) Bacterial mixtures, the future generation of inoculants for sustainable crop production. In:

- Maheshwari D, Dheeman S (eds) Field crops: Sustainable management by PGPR. Springer. Cham, Switzerland. pp. 11-44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30926-8_2
- Müller TM, Sandini IE, Rodrigues JD, Novakowski JH, Basi S, Kaminski TH (2015) La combinación de métodos de inoculación de *Azospirillum brasilense* con fertilización al voleo con nitrógeno aumenta el rendimiento del maíz. *Ciencia Rural* 46: 210-215.
- Noori F, Rahnama K, Mashayekhi K, Oghaz NA, Naeini SAM, Hatamzadeh S (2023) Investigation of the symbiotic relationship between *Serendipita indica* and ZP684 hybrid cultivar of maize plant under a combined condition of root rot disease (*Fusarium proliferatum*) and drought stress. *Biological Control* 184: 105-282. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105282>
- Parra-Cota FI, Coronel-Acosta CB, Amézquita-Avilés CF, Santos-Villalobos SDL, Escalante-Martínez DI (2018) Diversidad metabólica de microorganismos edáficos asociados al cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(2): 431-442.
- Pereira NCM, Galindo FS, Gazola RPD, Dupas E, Rosa PAL, Mortinho ES (2020) Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth promoting bacteria. *Frontiers in Environmental Science* 8(40): 1-12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00040>
- Robles C, Barea JM (2004) Respuesta de la planta y del suelo a inoculación con *Glomus intraradices* y rizobacterias en maíz en cultivo intensivo. *Terra Latinoamericana* 22 (1): 59-69.
- Rodríguez SD, Bianchi E, Conislla M, Campos AA, Sarquis HMA (2022) Impactos del Conflicto en Ucrania en el Comercio y la Seguridad Alimentaria de América Latina y el Caribe. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 17p.
- Rodríguez-Hernández MG, Gallégo-Robles MÁ, Rodríguez-Sifuentes L, Fortis-Hernández M, Luna-Ortega JG, González-Salas U (2020) Cepas nativas de *Bacillus* spp. como una alternativa sostenible en el rendimiento de forraje de maíz. *Terra Latinoamericana* 38(2): 313-321. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>
- Rojas MM, Tejera B, Bosh DM, Ríos Y, Rodríguez J, Heydrich M (2016) Potentialities of *Bacillus* strains for promoting growth in maize (*Zea mays* L.). *Cuban Journal of Agricultural Science* 50(3): 485-496.
- Sharma S, Kulkarni J, Jha B (2016) Halotolerant rhizobacteria promote growth and enhance salinity tolerance in peanut. *Frontiers in Microbiology* 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01600>
- SIAP (2023) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta 11 de octubre de 2024.
- Tilhaqui-Bertasello LE, Filla VA, Coelho AP, Môro GV (2021) Agronomic performance of maize (*Zea mays* L.) genotypes under *Azospirillum brasilense* application and mineral fertilization. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 53(1): 68-78. <https://doi.org/10.48162/rev.39.007>
- Uribe VG, Dzib ER (2006) Micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*), *Azospirillum brasilense* y brassinoesteroide en la producción de maíz en suelo luvisol. *Agricultura Técnica en México* 32(1): 67-76.
- Zambrano J, Sangoquiza CC, Campaña CD, Yáñez GC (2021) Use of biofertilizers in agricultural production. *Technology in Agriculture*: 1-18. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98264>