

## Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como complemento a la fertilización química

### Microorganisms in the biofertilization of corn crop as a complement to chemical fertilization

Manuel Canizalez-Silva<sup>1</sup>, Fidel Blanco-Macías<sup>2</sup>, Martha Patricia España-Luna<sup>1</sup>, Rodolfo de la Rosa-Rodríguez<sup>3</sup>, Julio Lozano-Gutiérrez<sup>1</sup>, Alfredo Lara-Herrera<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Carretera Zacatecas-Guadalajara, km 15.5, CP. 98170. Zacatecas, Zacatecas, México.

<sup>2</sup>Centro Regional Universitario Centro-Norte, Universidad Autónoma Chapingo, Cruz del Sur No. 100, Col. Constelación, El Orito, CP. 98085. Zacatecas, Zacatecas, México.

<sup>3</sup>Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, UAZ, Av. López Velarde 801, Zacatecas Centro, CP. 98000. Zacatecas, Zacatecas, México.

\*Autor de correspondencia: [alara204@hotmail.com](mailto:alara204@hotmail.com)

#### Nota científica

Recibida: 23 de septiembre 2023

Aceptada: 04 de enero 2024

**RESUMEN.** El aporte de nutrientes al cultivo de maíz en México es principalmente con fertilizantes químicos, sin embargo, el precio de estos insumos requiere buscar otras alternativas para abatir los costos, sin disminuir la producción. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto individual y combinado de *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* y *Serendipita indica* (ocho tratamientos) en la producción de maíz. El cultivo se estableció en Cieneguillas, Zacatecas, en condiciones de invernadero, en el año 2022. La inoculación de los microorganismos se realizó al momento de la siembra. Los ocho tratamientos con los microorganismos se evaluaron en un diseño experimental en bloques al azar con cuatro repeticiones. Con la co-inoculación de *A. brasilense* + *S. indica* se incrementó el rendimiento de toda la planta y el mayor rendimiento de grano con *A. brasilense* + *B. subtilis*, este último incremento, respecto al testigo, fue de 40%.

**Palabras clave:** *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, inoculación, *Serendipita indica*, *Zea mays* L.

**ABSTRACT.** In Mexico, the nutrients to the corn crop are supplied with chemical fertilizers, however, the price of these inputs requires looking for other alternatives to reduce costs, without reducing production. The objective of this work was to determine the individual and combined effect of *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, and *Serendipita indica*, (eight treatments) on corn production. The crop was established in Zacatecas, Mexico, under greenhouse conditions, in the year 2022. The microorganism's inoculation was carried out at the sowing time. The eight treatments with microorganisms were evaluated in an experimental design in randomized blocks with four repetitions. With the co-inoculation of *A. brasilense* and *S. indica* the yield of the entire plant was increased, and the highest grain yield with *A. brasilense* and *B. subtilis*, this last increased, compared with the control treatment, it was 40%.

**Keywords:** *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, inoculation, *Serendipita indica*, *Zea mays* L.

**Como citar:** Canizalez-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): e3903. DOI: 10.19136/era.a11n1.3903.

## INTRODUCCIÓN

En los años 2021 y 2022, México produjo 27 503 477.82 y 26 553 239.30 t de grano de maíz, en los años respectivos (SIAP 2022). Tal producción de grano se consume a un ritmo mayor del producido, dependiendo cada vez más de las importaciones (López-Perea 2019), que representan aproximadamente el 40% del maíz que se produce (CEDRSSA 2019). El suministro de nutrimentos que requiere el cultivo de maíz se lleva a cabo principalmente a base de fertilizantes químicos, sin embargo, el precio de éstos se incrementó entre el año 2021 y 2022 hasta 187% por lo cual es necesario explorar otras alternativas más ecológicas y sostenibles, en este contexto, los biofertilizantes son microorganismos que aportan o facilitan la absorción de nutrimentos del suelo por parte de las plantas, también estimulan el crecimiento de éstas (Nosheen *et al.* 2021). Entre los microorganismos que se utilizan como biofertilizantes son las bacterias *Azospirillum brasilense* (Martínez-Reyes *et al.* 2018) y *Bacillus subtilis* (Rodríguez-Hernández *et al.* 2020), y el hongo *Serendipita sp.* (Genre *et al.* 2020, Pourraeisi *et al.* 2022). Zimmer-Barbosa *et al.* (2022) inocularon *A. brasilense* en diferentes cultivares de maíz y diversas condiciones edafoclimáticas en Brasil, en el 21% de los casos reportan rendimiento de grano de hasta 3 000 kg ha<sup>-1</sup> y en el 1.5% de los casos el rendimiento fue de hasta 12 000 kg ha<sup>-1</sup>; la inoculación más efectiva fue a la semilla; la explicación de estos resultados lo atribuyen a la fijación de N y al incremento de crecimiento de las raíces, y por ende a la mayor absorción de agua y nutrimentos minerales.

Se ha reportado un incremento en el crecimiento de las plantas y del contenido de N por efecto de *Azospirillum* (Nguyen *et al.* 2019). También Gómez-Godínez *et al.* (2019) reportan este efecto cuando *Azospirillum brasilense* se co-inoculó con *Rhizobium phaseoli* y *Sinorhizobium americanum*; mientras que Morales-García *et al.* (2019) reportan efecto con *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Rhizobium*. También se reporta que *Azospirillum* tuvo el mayor rendimiento con disminución de costos de producción al reducir el empleo de fertilizantes inorgánicos, lo cual repercute un incremento neto del ingreso del 30% (Fernandes-Domingues *et al.* 2020). Una de las principales cualidades que tiene el género *Bacillus* es inhibir el crecimiento de microorganismos fitopatógenos: *Fusarium*, *Colletotrichum*, *Pythium*, *Magnaporthe* y *Phytophthora* (Villareal-Delgado *et al.* 2018) y *Botrytis cinerea* (Bolívar-Anillo *et al.* 2021), también hay evidencias de que promueve el crecimiento de las plantas (Bolívar-Anillo *et al.* 2021). El mayor crecimiento de las plantas por efecto de la inoculación con *B. subtilis* se debe a la solubilización y absorción de fosfato (García *et al.* 2015), la fijación de N (Rodríguez-Hernández *et al.* 2020) y, la solubilización de K (Bolívar-Anillo *et al.* 2021).

El hongo endófito *Serendipita indica* (conocido también como *Piriformosporas indica*), de la familia *Sebacinaceae*, genera beneficios similares que los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) pero su espectro de especies vegetales con los que se hospeda es más amplio y su especificidad de huésped es menor que la de los HMA; coloniza las raíces de plantas *Brassicaceae* las cuales no se asocian con los HMA (Sarkar *et al.* 2021, Saleem *et al.* 2022); solubiliza fosfato e induce el crecimiento de la planta (Nosheen *et al.* 2021, Tyagi *et al.* 2023); mejora la resistencia de las plantas al estrés hídrico y salino (Boorboori y Zhang 2022); induce resistencia de las plantas contra hongos fitopatógenos, como *Fusarium oxysporum* (Cheng *et al.* 2020); tiene la capacidad de asociarse con gran cantidad de especies vegetales, promueve el crecimiento y la producción de una alta diversidad de plantas entre ellas maíz (Genre *et al.* 2020). *S. indica* es de gran apoyo para

el suministro de nutrimentos para las plantas (Saleem *et al.* 2022). Debido a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto individual y la interacción entre *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* y *Serendipita indica* en la producción de maíz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

El experimento se realizó en condiciones de invernadero con control pasivo del clima, en Cieneguillas, Zacatecas, México, en las coordenadas 22° 43' 28" LN, 102° 41' 10" LO y a 2 234 m de altitud. En un suelo con textura franca, 2.75% de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico de 18 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, pH = 7.59, conductividad eléctrica de 1.03 dS m<sup>-1</sup>, alto contenido de K, contenido medio a alto de P, contenido medio de Ca, Mg y Cu, medio-bajo de Mn, y contenido bajo de N, S, Fe, Zn y B.

### Tratamientos y diseño experimental

Se aplicaron ocho tratamientos: (1) Testigo; (2) la co-inoculación de los tres microorganismos: *Azospirillum brasilense* (Ab), *Bacillus subtilis* (Bs) y *Serendipita indica* (Si); (3) Si; (4) Ab; (5) Bs; (6) Si+Ab; (7) Si+Bs y (8) Ab+Bs. El diseño experimental fue bloques completos al azar; con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental consistió de un surco con doble hilera de plantas y una longitud de 2 m, en ambas hileras se desarrollaron 20 plantas.

### Aplicación de microorganismos

Las cepas de *A. brasilense* y *B. subtilis* son aislados pertenecientes a una empresa, la cepa de *Serendipita indica* proviene de una colección pública cuyo aislado original fue de la India. La concentración de cada microorganismo fue de 1x10<sup>8</sup>, UFC ml<sup>-1</sup> de *A. brasilense*; 1x10<sup>7</sup> UFC ml<sup>-1</sup> de *B. subtilis*; y 10 000 esporas ml<sup>-1</sup> de *S. indica*. La concentración de cada microorganismo se diluyó 1:33 y de esta dilución se aplicaron 12 ml por tratamiento. La aplicación se realizó mediante aspersión. Después de colocar la semilla y asperjar la suspensión se cubrió con una capa de aproximadamente 5 cm de suelo.

### Siembra

Se realizó el 7 de mayo de 2022, de manera manual colocando la semilla directamente en el fondo del surco, el material genético fue el maíz híbrido amarillo DEKALB® "DK4020y", a una distancia entre semillas de 0.20 m, en camas a doble hilera a 0.50 m entre hileras y al centro entre las hileras una cinta de riego, con goteros cada 0.20 m, con flujo de 960 ml gotero<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Las camas midieron 25 m de largo, 0.80 m de ancho, 0.50 cm entre hileras, la distancia de centro de cama a centro de cama fue de 1.30 m. Con esta distribución se obtuvo una densidad equivalente a 76 900 plantas ha<sup>-1</sup>.

## Riegos y fertilización

Se utilizó un sistema de fertirriego. Hasta la etapa V6 se aplicó sólo agua. Desde la etapa V7 hasta R6 se aplicaron fertilizantes solubles. De la etapa de madurez a senescencia, gradualmente se redujo la magnitud de los riegos, exclusivamente con agua. Los riegos fueron aplicados con base en la humedad del suelo que indicaron los sensores de la marca Watermark®, colocados a profundidades de 15, 30 y 45 cm. Los riegos se aplicaron cuando la humedad entre las profundidades de 15 y 30 cm fue menor a -30 kPa, para mantener la humedad entre -15 y -30 kPa. La humedad a 45 cm de profundidad fue menor a -40 kPa. El volumen de agua aplicado del 5 de mayo al 28 de octubre fue de 76 800 L. La dosis de fertilización que se aplicó fue: 180-76-120-80-35-40, de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-S, respectivamente; también se aplicaron 1.2 kg por parcela experimental de la mezcla de Fe, Mn, Zn, B, Cu y Mo con concentración de 7.5, 3.5, 0.7, 0.65, 0.28 y 0.26%, respectivamente, durante el ciclo del cultivo; el riego y fertilización fue uniforme para todos los tratamientos, incluso al testigo.

## Variables de estudio y análisis estadístico

Las variables fueron: días a floración masculina y femenina, número de nudos, diámetro de tallo en R6 en la parte media del primer entrenudo con vernier digital, altura de planta en la etapa R6, diámetro de la mazorca en la parte media, longitud de la mazorca, hileras por mazorca, granos por hilera, granos por mazorca, altura a la mazorca o distancia entre la base de la planta a la base de la mazorca, peso de mazorca, peso de 200 granos, peso de rastrojo, peso de grano ajustado a 14% de humedad y peso de biomasa total. La información de los parámetros medidos, generados con el diseño experimental bloques al azar se sometió a un análisis de varianza y prueba de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Floración y crecimiento de plantas

La floración femenina inició a los 75 días después de la siembra y la floración masculina entre dos y tres días después. No se presentaron diferencias estadísticas en los inicios de ambos tipos de floraciones por efecto de los tratamientos ensayados. A los 78 días después de la siembra se presentó la sincronización de ambos tipos de floración.

El número de nudos en la planta disminuyó con el tratamiento donde se inoculó *B. subtilis* y con las co-inoculaciones de dos microorganismos, la disminución fue 5.6 a 9.0%. El diámetro del tallo fue mayor en 7.2% con la inoculación de *A. brasilense* respecto al tratamiento testigo, este mismo comportamiento lo presentó la altura de las plantas, el incremento respecto al tratamiento testigo fue de 8.5%; la altura de planta también fue estadísticamente diferente con los tratamientos inoculados con *B. subtilis* y con *S. indica* y con la co-inoculación con *A. brasilense* + *B. subtilis*, pero el mayor incremento de la altura de planta fue de 11.8% con el tratamiento donde se combinaron *S. indica* y *A. brasilense*. (Tabla 1).

**Tabla 1.** Número de nudos (NN), diámetro de tallo (DT), altura de planta (AP), diámetro de la mazorca (DM) y longitud de mazorca (LM) de maíz en la etapa R6, por efecto de la aplicación en la siembra de los microorganismos *Azospirillum brasilense* (Ab), *Bacillus subtilis* (Bs), *Serendipita indica* (Si) y las combinaciones entre ellos.

Tratamiento	NN	DT (mm)	AP (m)	DM (mm)	LM (cm)
Testigo	16.69a	26.21b	4.34d	51.33c	17.75ab
Si+Bs+Ab	16.69a	27.01ab	4.39cd	53.30abc	17.79ab
Si	16.69a	26.63ab	4.63ab	53.13bc	17.71ab
Ab	16.63a	28.09a	4.71ab	53.99ab	17.83ab
Bs	15.56b	25.46b	4.58bc	53.07bc	17.08b
Si+Ab	15.81b	26.99ab	4.85a	55.43a	18.13ab
Si+Bs	15.31b	26.13b	4.53bcd	53.73ab	18.17ab
Ab+Bs	15.56b	26.53ab	4.60bc	53.88ab	18.46a
DMS 0.05	0.567	1.758	0.221	2.237	1.310

Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ( $p < 0.05$ ).

### Tamaño de la mazorca

El diámetro de la mazorca fue hasta 4.1 mm mayor respecto al testigo. La longitud de la mazorca fue menor con la inoculación de *B. subtilis*, pero sólo fue diferente respecto a la co-inoculación con *A. brasilense* + *B. subtilis* (Tabla 1). El número granos por hilera, el número de hileras por mazorca, el número de granos por mazorca, el peso de la mazorca y la altura a la mazorca, no fueron diferentes por efecto de los tratamientos.

### Producción

El peso de 200 granos fue 13.16 y 14.28 g mayor con el tratamiento donde se inoculó con *A. brasilense* y con la co-inoculación de *S. indica* + *A. brasilense*, en ambos casos respecto al tratamiento testigo. Las plantas de maíz provenientes de semillas sin inocular resultaron ser las que presentaron menor peso de rastrojo y de grano, y por consecuente la menor biomasa total, estos resultados son estadísticamente diferentes a los obtenidos con la co-inoculación de *S. indica* + *A. brasilense*, con la cual el peso de biomasa total (rastrojo + grano) y de rastrojo fueron 39.7 y 48.5% mayores, respectivamente, que el tratamiento testigo; el peso de grano fue estadísticamente mayor con la co-inoculación de *A. brasilense* + *B. subtilis*, el incremento del peso de grano respecto a la no inoculación (testigo) fue de 40.1%. En todos los tratamientos donde se inoculó con *A. brasilense*, ya sea sola o combinada con alguno de los otros dos microorganismos, el peso de grano fue mayor que con el tratamiento testigo (Tabla 2).

La inoculación específica de un sólo microorganismo presentó efecto significativo sólo con *A. brasilense* en el rendimiento de biomasa y de grano, el incremento respecto al tratamiento testigo fue de 25.3% en la biomasa total y de 22.7% en el rendimiento de grano; lo cual concuerda con el incremento del rendimiento de maíz reportado por Swędrzyńska y Sawicka (2000), con la inoculación de esta rizobacteria el incremento del rendimiento medio fue de 17%; Hungria *et al.*

(2010) encontraron un incremento en la producción de biomasa del 30% con *A. brasilense* y *A. lipoferum*; también Martínez-Reyes *et al.* (2018) reportaron un incremento de 27.98% del rendimiento de grano con la inoculación de *A. Brasilense*. Tilhaqui-Bertasello *et al.* (2021) evaluaron 48 genotipos de maíz, los cuales fueron tratados con 140 kg ha<sup>-1</sup> de N, versus esos mismos genotipos inoculados al suelo con *A. brasilense*, encontraron que en ocho de los genotipos el rendimiento de grano fue mayor con la inoculación de la rizobacteria que con la fertilización con urea, en los otros 40 genotipos no hubo diferencias en el rendimiento, es decir, en ningún caso la fertilización química superó a la biológica.

**Tabla 2.** Peso de: 200 granos, del total de las plantas (rastrajo + grano), del rastrojo, y del grano, por efecto de la aplicación en la siembra de los microorganismos *Azospirillum brasilense* (Ab), *Bacillus subtilis* (Bs), *Serendipita indica* (Si) y las combinaciones entre ellos.

Tratamiento	Peso 200 granos (g)	Peso total (kg parcela <sup>-1</sup> )	Peso de rastrojo (kg parcela <sup>-1</sup> )	Peso de grano (kg parcela <sup>-1</sup> )
Testigo	72.39b	7.640c	4.234b	3.406c
Si+Bs+Ab	79.75ab	8.981abc	4.764b	4.216ab
Si	75.59b	8.364bc	4.689b	3.675bc
Ab	85.55a	9.575ab	5.396ab	4.180ab
Bs	78.90ab	8.618bc	4.570b	4.047abc
Si+Ab	86.67a	10.670a	6.289a	4.381ab
Si+Bs	79.09ab	9.089abc	4.981ab	4.108abc
Ab+Bs	85.42a	10.070ab	5.296ab	4.771a
DMS 0.05	7.793	1.9230	1.4979	0.7417

Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales (p < 0.05).

El mayor crecimiento de las plantas y de la producción de rastrojo y de grano con los tratamientos donde se inoculó con *A. brasilense*, ya sea sola o combinada con *B. subtilis* y/o con *S. indica*, se puede atribuir al efecto que tiene *A. brasilense* en la estimulación del crecimiento de las raíces mediante la síntesis y liberación de ácido-indol-acético (Hungria *et al.* 2022) y/o a la fijación de N de manera libre (Gómez-Godínez *et al.* 2019, Morales-García *et al.* 2019, Nguyen *et al.* 2019, Hungria *et al.* 2022).

Se esperaba que los beneficios que aportan cada microorganismo se mantenga de forma aditiva al combinarlos entre sí, de manera similar como lo reportan Molina-Romero *et al.* (2021) quienes al reducir el 50% la aplicación de fertilizantes químicos no disminuyó el rendimiento de grano de maíces amarillos autóctonos; sin embargo, con la co-inoculación de los tres microorganismos eso no ocurrió en el presente ensayo. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible que exista alguna interacción menos favorable entre algunos de los microorganismos, particularmente entre las cepas ensayadas de *B. subtilis* y *S. indica*. Morales-García *et al.* (2019) coinciden en que se requiere generar más información que dilucide este comportamiento. Es importante resaltar que los mejores resultados se obtuvieron cuando se combinó *A. brasilense* con *B. subtilis* o con *Serendipita indica*. Al respecto, Robles y Barea (2004) reportan mayor biomasa de

maíz por efecto de la co-inoculación de *Serendipita sp*, *A. brasilense* y *B. subtilis* en dos suelos, el incremento de la producción fue de 20 y 6% en los suelos respectivos. Mientras que Hauka (2000) reportó un incremento en la producción de biomasa de maíz con la co-inoculación de *A. brasilense*, *Bacillus megaterium* y *Glomus macrocarpus* respecto a las inoculaciones específicas e incluso que la aplicación absoluta de fertilizantes minerales, este incremento del rendimiento fue de 44%. En el presente ensayo no hubo diferencias estadísticas entre el tratamiento testigo y la co-inoculación de los tres microorganismos en la producción de biomasa, sin embargo, el incremento de esta variable fue de 17.6%. El mayor incremento de biomasa fue con la co-inoculación de *A. brasilense* – *S. indica*, respecto al tratamiento testigo, el cual fue de 39.7% (Tabla 2).

El mayor interés de los agricultores es la producción de grano, el incremento de éste al co-inocular con los tres microorganismos respecto al tratamiento testigo fue de 23.8%; pero los mayores incrementos en producción de grano se presentaron con las co-inoculaciones de *A. brasilense* + *S. indica* y *A. brasilense* + *B. subtilis*, los incrementos en la producción fueron de 28.6 y 40.1%, respectivamente. Uribe-Valle y Dzib-Echeverría (2006), también reportan un incremento en el rendimiento de grano de maíz por efecto de la co-inoculación de *A. brasilense* + *Glomus intrarradices* en un suelo Luvisol, tratado sólo con estos microorganismos, y con dos dosis de fertilización adicionales a los microorganismos (13-33-00 y 26-66-00), el incremento del rendimiento respecto al testigo fue de 7.82, 8.71 y 5.67%, respectivamente, en promedio el incremento del rendimiento con la co-inoculación fue de 7.40%. La razón por la cual el incremento del rendimiento fue mayor en el presente ensayo se atribuye al mejor control de los factores ambientales que influyen en el desarrollo del cultivo, por el hecho de haber llevado a cabo el ensayo en invernadero y con fertirrigación.

La co-inoculación de la semilla de maíz con *S. indica* y *A. brasilense* favoreció el comportamiento de los rasgos altura de planta, diámetro de la mazorca, peso de 200 granos, peso de rastrojo y producción de biomasa de maíz (rastrojo + grano). El incremento de la biomasa total (rastrojo + grano) con la co-inoculación de *A. brasilense* + *S. indica* fue de 39.7%; la co-inoculación con *A. brasilense* + *B. subtilis* generó el mayor rendimiento de grano de maíz, el incremento fue de 40.1%, en ambos casos respecto al testigo. Las inoculaciones individuales de *A. brasilense*, *B. subtilis* o *S. indica* ocasionaron menor efecto en las plantas de maíz que con las co-inoculaciones de dos o tres microorganismos. Por otro lado, la co-inoculación de la semilla con los tres microorganismos provocó menor efecto en el desarrollo de las plantas y en el rendimiento de maíz, con respecto a las co-inoculaciones con *S. indica* + *A. brasilense*, y con *A. brasilense* + *B. subtilis*.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kJv7j5HhPGhwXRNmcMP86s2QWWpjokKt/edit?usp=sharing&oid=108925216282588793184&rtpof=true&sd=true>

## LITERATURA CITADA

- Bolivar-Anillo HJ, González-Rodríguez VE, Cantoral JM, García-Sánchez D, Collado IG, Garrido C (2021) Endophytic bacteria *Bacillus subtilis*, isolated from *Zea mays*, as potential biocontrol agent against *Botrytis cinerea*. *Biology* 10(6): 492. <https://doi.org/10.3390/biology10060492>.
- Boorboori MR, Zhang HY (2022) The role of *Serendipita indica* (*Piriformospora indica*) in improving plant resistance to drought and salinity stresses. *Biology* 11(17): 952. <https://doi.org/10.3390/biology11070952>.
- CEDRSSA (2019) Producción de granos básicos y suficiencia alimentaria 2019-2024. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México. <http://201.147.98.23/Ver/Documento/3404>. Fecha de consulta: 16 de mayo de 2023.
- Cheng C, Li D, Qi Q, Sun X, Raphael-Anue M, Mahoudjro-David B, Zhang Y, Hao X, Zhang Z, Lai Z (2020) The root endophytic fungus *Serendipita indica* improves resistance of banana to *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4. *European Journal of Plant Pathology* 156: 87-100. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01863-3>.
- Fernandes-Domingues C, Cecato U, Biserra TT, Mamédio D, Galbeiro S (2020) *Azospirillum* spp. en gramíneas y forrajeras Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 11(1): 223-40. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951>.
- García RA, Lovaisa NC, Ulla EL (2015) Aislamiento caracterización de bacterias solubilizadoras de fosfatos del noroeste argentino y su efecto en la promoción de crecimiento en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Agronómica del Noreste Argentino* 35(1): 13-28.
- Genre A, Lanfranco L, Perotto S, Bonfante P (2020) Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology* 18: 649–660. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>.
- Gómez-Godínez LJ, Valverde SLF, Romero JCM, Martínez-Romero E (2019) Metatranscriptomics and nitrogen fixation from the rhizoplane of maize plantlets inoculated with a group of PGPRs. *Systematic and Applied Microbiology* 42(4): 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.05.003>.
- Hauka FIA (2000) Effect of using single and composite inoculation with *Azospirillum brasilense*, *Bacillus megaterium* and *Glomus macrocarpus* for improving growth of *Zea mays*. *Journal of Agriculture Chemistry and Biotechnology* 25(4): 2327-2338. <https://doi.org/10.21608/JACB.2000.258940>.
- Hungria M, Campo RJ, Souza EM, Pedrosa FO (2010) Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil* 331: 413-425. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>.
- Hungria M, Barbosa JZ, Rondina ABL, Nogueira MA (2022) Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Agronomy Journal* 114(5): 2969-2980. <https://doi.org/10.1002/agj2.21150>.
- López-Perea R (2019) Maíz para México plan estratégico 2030. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 146p.
- Martínez-Reyes L, Aguilar-Jiménez CE, Carcaño-Montiel MG, Galdámez-Galdámez J, Gutiérrez-Martínez A, Morales-Cabrera JA, Martínez AFB, Llaven MJ, Gómez PE (2018) Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra* 5(1): 26-37. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>.
- Molina-Romero D, Juárez-Sánchez S, Venegas B, Ortiz-González CS, Baez A, Morales-García YE, JM Muñoz-Rojas J (2021) A bacterial consortium interacts with different varieties of maize, promotes the plant growth, and reduces the application of chemical fertilizer under field conditions. *Frontiers Sustainable Food Systems*. 4: 616757. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.616757>.
- Morales-García YE, Baez A, Quintero-Hernández V, Molina-Romero D, Rivera-Urbalejo A, 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*. Sustainable Development and Biodiversity 23: 11-44. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30926-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30926-8_2).
- Nguyen ML, Spaepen S, Du Jardin P, Delaplace P (2019) Biostimulant effects of rhizobacteria on wheat growth and nutrient uptake depend on nitrogen application and plant development. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65(1): 58-73. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1485074>.
- Nosheen S, Ajmal I, Song Y (2021) Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production. *Sustainability* 13: 1868. <https://doi.org/10.3390/su13041868>.



- Pourraeisi A, Boorboori MR, Sepehri M (2022) A comparison of the effects of *Rhizophagus intraradices*, *Serendipita indica*, and *Pseudomonas fluorescens* on soil and *Zea mays* L. properties under drought stress condition. *International Journal of Sustainable Agricultural Research* 9(4): 152-167. <https://doi.org/10.18488/ij sar.v9i4.3167>.
- 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-Hernández MG, Gallegos-Robles MÁ, Rodríguez-Sifuentes L, Fortis-Hernández M, Luna-Ortega J, González-Salas U (2020) Native *Bacillus* spp. Strains as sustainable alternative in the yield of corn forage. *Terra Latinoamericana* 38(2): 323-331. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>.
- Saleem S, Sekara A, Pokluda R (2022) *Serendipita indica*-A review from agricultural point of view. *Plants* 11(24): 3417. <https://doi.org/10.3390/plants11243417>.
- Sarkar S, Dey A, Kumar V, Batiha GES, El-Esawi MA, Tomczyk M, Ray P (2021) Fungal endophyte: an interactive endosymbiont with the capability of modulating host physiology in myriad ways. *Frontiers in Plant Science* 12: 701800. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.701800>.
- SIAP (2022) Anuario estadístico de la producción agrícola en México 2021. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 16 de mayo de 2023.
- Swędrzyńska D, Sawicka A (2000) Effect of inoculation with *Azospirillum brasilense* on development and yielding of maize (*Zea mays* ssp. *Saccharata* L.) under different cultivation conditions. *Polish Journal of Environmental Studies* 9(6): 505-509.
- Tilhaqui-Bertasello LE, Augusto-Filla V, Prates-Coelho A, Vitti-Môro G (2021) Agronomic performance of maize genotypes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo* 53(1): 68-78. <https://doi.org/10.48162/rev.39.007>.
- Tyagi J, Mishra A, Kumari S, Singh S, Agarwal H, Pudake RN, Varma A, Joshi NCh (2023) Deploying a microbial consortium of *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices*, and *Azotobacter chroococcum* to boost drought tolerance in maize. *Environmental and Experimental Botany* 206: 105-142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105142>.
- Uribe-Valle G, Dzib-Echeverría R (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.
- Villareal-Delgado MF, Villa-Rodríguez ED, Cira-Chávez KA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, Santos-Villalobos F (2018) El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1): 95-130. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1706-5>.
- Zimmer-Barbosa J, Almeida-Roberto L, Hungria L, Studart-Corrêa, R, Magri E, Drummond-Correia T (2022) Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. *Applied Soil Ecology* 170. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>.