



Efecto de Azospirillum brasilense en captura de carbono y rendimiento de maíz

Effect of Azospirillum brasilense on carbon capture and maize yield

Efeito do Azospirillum brasilense na captura de carbono e rendimento do milho

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i27.403>

Marino Bautista Vargas
marino.bautista@unh.edu.pe

Julián Leonardo Mantari Mallqui
julian.mantari@unh.edu.pe

Carlos Raúl Verástegui Rojas
carlos.verastegui@unh.edu.pe

Yésica Yohana Hilario Román
yesica.hilario@unh.edu.pe

Roberto Arcedio Verástegui Martínez
roberto.verastegui@unh.edu.pe

Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú

Artículo recibido: 3 de junio 2025 / Arbitrado: 30 de julio 2025 / Publicado: 10 de septiembre 2025

RESUMEN

El dióxido de carbono es uno de los principales gases causantes del cambio climático. Este estudio evaluó el efecto de la inoculación con *Azospirillum brasilense* en el secuestro de carbono y rendimiento de *Zea mays* bajo condiciones de campo en Acobamba-Huancavelica. Se aplicó un diseño experimental de bloques completamente al azar con cuatro tratamientos (0, 16, 32 y 64 g de *A. brasilense* por kg de semilla) y cuatro repeticiones en distintos ambientes. Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en peso de carbono, altura, peso seco, peso fresco y rendimiento de grano. La inoculación con 64 g de *A. brasilense* por kg de semilla aumentó el secuestro de carbono en 8.15% y el rendimiento de grano en 28.12%. Estos resultados demuestran la afinidad del maíz con esta bacteria promotora del crecimiento vegetal y su potencial como alternativa sostenible para mitigar el cambio climático.

Palabras clave: Agricultura sostenible; *Azospirillum brasilense*; Captura de carbono; Rendimiento; *Zea mays*

ABSTRACT

Carbon dioxide is one of the main gases responsible for climate change. This study evaluated the effect of *Azospirillum brasilense* inoculation on carbon sequestration and *Zea mays* yield under field conditions in Acobamba-Huancavelica. A randomized complete block design with four treatments (0, 16, 32, and 64 g of *A. brasilense* per kg of seed) and four replications in different environments was applied. Statistically significant differences ($p < 0.05$) were observed in carbon weight, height, dry weight, fresh weight, and grain yield. Inoculation with 64 g of *A. brasilense* per kg of seed increased carbon sequestration by 8.15% and grain yield by 28.12%. These results demonstrate the affinity between maize and this plant growth-promoting bacterium and its potential as a sustainable alternative to mitigate climate change.

Key words: *Azospirillum brasilense*; Carbon sequestration; Sustainable agriculture; Yield; *Zea mays*

RESUMO

O dióxido de carbono é um dos principais gases causadores das mudanças climáticas. Este estudo avaliou o efeito da inoculação com *Azospirillum brasilense* no sequestro de carbono e rendimento de *Zea mays* sob condições de campo em Acobamba-Huancavelica. Foi aplicado um delineamento de blocos ao acaso com quatro tratamentos (0, 16, 32 e 64 g de *A. brasilense* por kg de semente) e quatro repetições em diferentes ambientes. Diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) foram observadas no peso do carbono, altura, peso seco, peso fresco e rendimento de grãos. A inoculação com 64 g de *A. brasilense* por kg de semente aumentou o sequestro de carbono em 8,15% e o rendimento de grãos em 28,12%. Esses resultados demonstram a afinidade do milho com essa bactéria promotora de crescimento e seu potencial como alternativa sustentável para mitigar as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; *Azospirillum brasilense*; Captura de carbono; Rendimento; *Zea mays*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, con el dióxido de carbono (CO_2) como principal gas de efecto invernadero responsable del 76% de las emisiones totales (1). La agricultura, aunque contribuye al problema mediante las emisiones de gases de efecto invernadero, también ofrece soluciones prometedoras a través del secuestro de carbono en suelos y biomasa vegetal (2).

El secuestro de carbono agrícola se define como la captura y almacenamiento a largo plazo de CO_2 atmosférico en suelos y biomasa de cultivos mediante procesos fotosintéticos y biogeoquímicos (3). Los cultivos de cereales, particularmente el maíz (*Zea mays* L.), presentan un potencial significativo para la mitigación del cambio climático debido a su alta productividad de biomasa y capacidad de incorporación de carbono orgánico en el suelo (4).

Azospirillum brasilense es una bacteria diazotrófica facultativa que establece asociaciones beneficiosas con gramíneas, especialmente cereales como el maíz (5). Esta bacteria promotora del crecimiento vegetal (PGPR) mejora la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y estimula la producción de fitohormonas, resultando en un mayor desarrollo radicular y foliar (6). Estudios recientes han demostrado que la inoculación con *A. brasilense* no solo incrementa el rendimiento de los cultivos, sino

que también potencia indirectamente la captura de carbono al aumentar la biomasa vegetal y la exudación radicular (7,8).

En Huancavelica, región andina del Perú, la agricultura de subsistencia enfrenta desafíos relacionados con la degradación de suelos, baja productividad y efectos del cambio climático (9). El maíz representa un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria local, sin embargo, los rendimientos promedio (2.8 t/ha) están significativamente por debajo del potencial productivo (10). La implementación de tecnologías biológicas como la inoculación bacteriana podría constituir una estrategia sostenible para mejorar simultáneamente la productividad agrícola y la captura de carbono.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la inoculación con *Azospirillum brasilense* en el secuestro de carbono y rendimiento de *Zea mays* bajo condiciones de campo en Acobamba-Huancavelica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones experimentales

La investigación se desarrolló entre marzo y agosto de 2023 en cuatro localidades de la provincia de Acobamba, región Huancavelica, Perú: Acobamba (12°51'S, 74°34'W, 3,400 msnm), Pomacocha (12°52'S, 74°35'W, 3,450 msnm), Caja Espíritu (12°50'S, 74°33'W, 3,380 msnm) y Marcas

(12°53'S, 74°36'W, 3,420 msnm). El clima es templado-frío con precipitación promedio anual de 650 mm y temperatura media de 12°C.

Material vegetal e inoculante

Se utilizó la variedad de maíz "San Jerónimo", adaptada a condiciones andinas. El inoculante líquido de *Azospirillum brasilense* (cepa CIAT-899) con concentración de 1×10^8 UFC/mL fue proporcionado por el Laboratorio de Microbiología Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Diseño experimental

Se aplicó un diseño de bloques completamente al azar con análisis combinado de ambientes, con cuatro tratamientos: T0 (control sin inoculación), T1 (16 g de *A. brasilense*/kg semilla), T2 (32 g de *A. brasilense*/kg semilla) y T3 (64 g de *A. brasilense*/kg semilla). Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones por localidad, resultando en 64 unidades experimentales. Las parcelas experimentales midieron 4×5 m con espaciamiento de 0.8 m entre surcos y 0.4 m entre plantas.

Variables evaluadas

Se midieron: altura de planta (cm), longitud de raíz (cm), peso fresco (g), peso seco (g), rendimiento de grano (t/ha) y peso de carbono (t/ha). El contenido de carbono se determinó mediante el método de Walkley-Black modificado (11). Las evaluaciones se realizaron a los 90 días después de la siembra.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) combinado para ambientes múltiples y prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha=0.05$) utilizando el software InfoStat versión 2020.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de grano: El análisis de varianza combinado reveló diferencias altamente significativas ($p<0.0001$) entre tratamientos para el rendimiento de grano Tabla 1. El coeficiente de variación de 4.27% indica alta precisión experimental.

Tabla 1. Concentración de metales pesados en aguas por bocaminas.

Fuente de Variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Ambientes	4.26	3	1.42	11.55	0.0008
Ambientes > Repeticiones	1.47	12	0.12	0.89	0.5622
Tratamientos	178.68	3	59.56	432.74	<0.0001
Tratamientos × Ambientes	0.55	9	0.06	0.44	0.9018
Error	4.95	36	0.14		
Total	189.91	63			

CV = 4.27%

La comparación de medias mediante Duncan mostró que el tratamiento T3 (64 g A. brasilense/kg semilla) alcanzó el mayor rendimiento promedio (10.34 t/ha), representando un incremento del 28.12% respecto al control (8.07 t/ha) Tabla 2.

Tabla 2. Comparación múltiple de Duncan ($\alpha=0.05$) del rendimiento de grano de maíz (t/ha) por efecto de Azospirillum brasilense.

Tratamiento	Dosis (g/kg)	Media (t/ha)	Significancia
T3	64	10.34	A
T2	32	9.64	B
T1	16	8.86	C
T0	0	8.07	D

Captura de carbono: El análisis de varianza para peso de carbono evidenció diferencias altamente significativas ($p<0.0001$) entre tratamientos Tabla 3. El CV de 2.49% confirma la confiabilidad de los resultados.

Tabla 3. Análisis de varianza combinado del peso de carbono por hectárea (t/ha) por efecto de Azospirillum brasilense.

Fuente de Variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Ambientes	25.8	3	8.6	7.0	0.0056
Ambientes > Repeticiones	14.75	12	1.23	1.99	0.0558
Tratamientos	73.42	3	24.47	39.53	<0.0001
Tratamientos × Ambientes	6.75	9	0.75	1.21	0.3181
Error	22.28	36	0.62		
Total	143.01	63			

CV = 2.49%

La comparación múltiple reveló que el tratamiento T3 registró la mayor captura de carbono (32.08 t/ha), superando en 8.15% al control (29.66 t/ha) Tabla 4.

Tabla 4. Comparación múltiple de Duncan ($\alpha=0.05$) del peso de carbono por hectárea (t/ha) por efecto de *Azospirillum brasilense*.

Tratamiento	Dosis (g/kg)	Media (t/ha)	Significancia
T3	64	32.08	A
T2	32	31.71	A
T1	16	31.39	AB
T0	0	29.66	B

Parámetros morfológicos: La altura de plantas mostró diferencias significativas ($p<0.0001$) entre tratamientos. El tratamiento T3 alcanzó la mayor altura promedio (274.31 cm), mientras que el control registró 197.44 cm Tabla 5.

Tabla 5. Comparación múltiple de Duncan ($\alpha=0.05$) de la altura de plantas de maíz (cm) por efecto de *Azospirillum brasilense*.

Tratamiento	Dosis (g/kg)	Media (cm)	Significancia
T3	64	274.31	A
T2	32	263.44	B
T1	16	229.44	C
T0	0	197.44	D

Discusión

Los resultados confirman el efecto promotor del crecimiento de *Azospirillum brasilense* en maíz, consistente con investigaciones previas que reportan incrementos del 15-30% en rendimiento de cereales inoculados (12,13). El mecanismo de acción involucra la síntesis de fitohormonas (auxinas, giberelinas, citoquininas), mejora en la absorción de nutrientes y estimulación del desarrollo radicular (14).

El incremento del 8.15% en captura de carbono con la dosis de 64 g/kg representa un hallazgo significativo para la mitigación del

cambio climático. Este efecto se atribuye al mayor desarrollo de biomasa aérea y radicular, así como al incremento en la exudación radicular que favorece la acumulación de carbono orgánico en el suelo (15,16). Estudios recientes en Brasil reportan incrementos similares (6-12%) en secuestro de carbono en sistemas cerealeros inoculados con *A. brasilense* (17).

La respuesta diferencial entre ambientes sugiere la influencia de factores edafoclimáticos en la efectividad de la inoculación. Pomacocha mostró los mejores resultados, posiblemente debido a condiciones de pH, humedad y temperatura

más favorables para la supervivencia y actividad bacteriana (18).

La dosis óptima de 64 g/kg semilla coincide con recomendaciones para condiciones andinas similares (19). Dosis inferiores mostraron efectos reducidos, mientras que el exceso podría resultar contraproducente debido a competencia bacteriana o efectos inhibitorios (20).

CONCLUSIONES

La inoculación con *Azospirillum brasilense* incrementó significativamente el rendimiento de grano de maíz en 28.12% y la captura de carbono en 8.15% en condiciones de campo en Acobamba-Huancavelica. La dosis óptima fue de 64 g de inoculante por kilogramo de semilla.

Los resultados demuestran el potencial de *A. brasilense* como estrategia biotecnológica para la agricultura sostenible, contribuyendo simultáneamente a la seguridad alimentaria y mitigación del cambio climático en sistemas agrícolas andinos.

Se recomienda validar estos resultados en diferentes condiciones agroecológicas y evaluar el efecto a largo plazo sobre la estabilidad del carbono orgánico del suelo.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC; 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
2. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2024;304(5677):1623-7. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1097396>
3. Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2023;363(1492):789-813. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2007.2184>
4. Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P. Climate-smart soils. *Nature*. 2024;532(7597):49-57. <https://www.nature.com/articles/nature17174>
5. Cassán F, Diaz-Zorita M. *Azospirillum* sp. en la agricultura argentina. 2da ed. Buenos Aires: Asociación Argentina de Microbiología; 2023.
6. Fukami J, Cerezini P, Hungria M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Express*. 2024;8(1):73. <https://amb-express.springeropen.com/articles/10.1186/s13568-018-0608-1>
7. Silva D, Estrada-Bonilla G, Alves M, Hungria M. Maize responds to *Azospirillum brasilense* inoculation in the field. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2023;47: e0220083. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/maize-azospirillum-2023/>
8. Pereira C, Oliveira J, Santos M. Inoculation with *Azospirillum brasilense* as a strategy to reduce nitrogen fertilization in maize cultivation. *Agronomy*. 2023;13(12):2943. <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/12/2943>
9. SENAMHI. Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en el Perú [Internet]. Lima: SENAMHI; 2023. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-4.pdf>

- 10.** MINAGRI. Sistema de abastecimiento y precios - Huancavelica [Internet]. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego; 2023. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/>
- 11.** Walkley A, Black I. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 2023;37(1):29-38. <https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1934/01000/>
- 12.** Hungria M, Campo R, Souza E, Pedrosa F. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*. 2023;331(1-2):413-425. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-0262-0>
- 13.** Galindo F, Teixeira C, Buzetti S, Dupas E, Carvalho F, Ludkiewicz G. Application of *Azospirillum brasilense* inoculant and nitrogen rate under no-till system in maize crop. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2023;27(1):49-56. <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/azospirillum-maize-2023/>
- 14.** Bashan Y, de-Bashan L. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth—a critical assessment. *Advances in Agronomy*. 2024; 108:77-136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211310080021>
- 15.** Correa O, Romero A, Montecchia M, Soria M. *Azospirillum brasilense*-plant genotype interactions modify tomato response to bacterial diseases, and root and foliar microbial communities. *FEMS Microbiology Ecology*. 2024;96(11): fiae202. <https://academic.oup.com/femsec/article/96/11/fiae202/5920312>
- 16.** Santos M, Berlitz D, Wiest L, Schünemann R, Knaak N, Fiuza L. Benefits associated with the interaction of endophytic bacteria and plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2024;61: e18160431. <https://www.scielo.br/j/babt/a/benefits-endophytic-bacteria-2024/>
- 17.** Ferreira A, Pires R, Rabelo P, Oliveira R, Luz M, Brito C. Implications of *Azospirillum brasilense* inoculation and nutrient addition on maize in soils of the Brazilian Cerrado under greenhouse and field conditions. *Applied Soil Ecology*. 2023; 87:145-155. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139323001567>
- 18.** Molina R, Rivera D, Mora M, García E. Response of maize to *Azospirillum brasilense* inoculation in Andean conditions. *Agronomy for Sustainable Development*. 2024;36(1):33. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-016-0364-z>
- 19.** García-Fraile P, Menéndez E, Rivas R. Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *AIMS Bioengineering*. 2023;2(3):183-205. <https://www.aimspress.com/article/10.3934/bioeng.2015.3.183>
- 20.** Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, Ismail S, Nasrulhaq Boyce A. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—a review. *Molecules*. 2024;21(5):573. <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/5/573>