

Respuesta de tres cultivares de maíz a la inoculación con *Azospirillum brasilense* bajo cuatro diferentes dosis de nitrógeno

Andrés González Huerta*, Delfina de Jesús Pérez López*, Omar Franco Mora*, Artemio Balbuena Melgarejo*, Francisco Gutiérrez Rodríguez*, Heladio Romero Salas*

Recepción: 10 de agosto de 2010
Aceptación: 22 de noviembre de 2010

* Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Correo electrónico: agonzalez@uaemex.mx;
djperez@uaemex.mx; ofrancom@uaemex.mx;
abalbuenam@uaemex.mx; fgfrca@hotmail.com;
heladioromero-4@hotmail.com

Resumen. En el municipio de Huamuxtitlán, estado de Guerrero, México, se evaluó la respuesta de los materiales de maíz VS-535, H-507 y criollo veracruzano en las dosis de 0, 30, 60 y 90 kg de nitrógeno ha⁻¹, con y sin *Azospirillum brasilense*. En el sintético VS-535 se registró el mayor rendimiento de grano (5.23 t ha⁻¹). En las dosis de 0, 30, 60 y 90 kg de N ha⁻¹ se registraron 4.38, 4.36, 4.81 y 4.93 t ha⁻¹, respectivamente. La diferencia entre aplicar o no *Azospirillum brasilense* (promedio sobre los factores A, B y repeticiones) fue de 1.47 t ha⁻¹ y de dos días en el ciclo biológico del cultivo.

Palabras clave: *Zea mays*, nitrógeno, ensayo de rendimiento, *Azospirillum brasilense*.

Response of Three Corn Varieties to Inoculation with *Azospirillum Brasilense* in Four Different Nitrogen Rates

Abstract. Present work was performed at the municipality of Huamuxtitlan, State of Guerrero, Mexico. The effect of four doses of nitrogen (N): 0, 30, 60 and 90 kg per ha with or without *Azospirillum brasilense* on three genotypes of corn, that is Veracruzano, H-507 and VS-535, were evaluated. VS-535 showed the higher grain yield (5.25 t ha⁻¹); on the other hand, for 0, 30, 60 and 90 kg of N ha⁻¹, grain yield was 4.38, 4.36, 4.81 and 4.93 t ha⁻¹, respectively. The difference among with or without *Azospirillum brasilense* application (arithmetic mean on factors A, B, and replications) on grain yield was 1.47 t ha⁻¹ and there was a difference in two days on the growth period.

Key words: *Zea mays*, nitrogen, grain yield trial, *Azospirillum brasilense*.

Introducción

En los cultivos para grano, el maíz (*Zea mays* L.) ocupa el primer lugar en México y el tercero en el mundo por su producción alimentaria. En México su importancia está relacionada con su empleo como alimento para el hombre, las aves y el ganado. En el estado de Guerrero, México, existe una superficie cultivable de casi 750 000 ha; en esta entidad, el maíz ocupa casi la mitad de esta superficie y un 96% de ésta se siembra en condiciones de secano o temporal, en regiones con precipitación pluvial entre 800 y 1 200 mm, con distribución errática en las costas y sequía edáfica en la montaña (Romero, 2009).

En la naturaleza existen bacterias capaces de convertir a la molécula de nitrógeno a amoníaco, mediante la enzima nitrogenasa. En los últimos años ha despertado gran interés el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, denominados también rizobacterias, bioestimulantes, biofertilizantes o inoculantes (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2000); los más utilizados son las bacterias de los géneros *Rhizobium* y *Azospirillum*, así como hongos micorrízicos del género *Glomus* (Holgún *et al.*, 2003; Irizar *et al.*, 2003). En la agricultura se ha practicado la inoculación con *Rhizobium* en leguminosas y con *Azospirillum* en gramíneas. Las especies de *Azospirillum* han sido encontradas en asociación con raíces

de varias gramíneas importantes, como maíz y trigo (*Triticum aestivum* L.). También ha sido encontrada en asociación con plantas de las familias *Leguminosae*, *compositae* y *cactaceae*, entre otras. La inoculación con *Azospirillum brasilense* ha incrementado entre 30 y 36% la producción de grano y materia seca del maíz (García-Olivares *et al.*, 2007).

En México, la alta productividad del maíz está relacionada con paquetes tecnológicos que incluyen altas dosis de fertilización química que representan casi el 30% del costo total del cultivo; los problemas de contaminación del ambiente, las pérdidas en el suelo y la dificultad para transportar y distribuir eficientemente los fertilizantes, hace necesario identificar alternativas que permitan a los agricultores evitar su empleo excesivo y sustituirlo parcial o totalmente para incrementar sus ingresos. La identificación de variedades de maíz con mejor respuesta a dosis bajas de nitrógeno e interacción positiva entre este nutriente y la aplicación de biofertilizantes, podría ser importante para alcanzar este propósito.

De acuerdo con lo mencionado arriba, en la presente investigación se evaluó, en condiciones de campo, la respuesta de los tres cultivares de maíz identificados como VS-535, H-507 y criollo veracruzano fertilizados con dosis de 0, 30, 60 y 90 kg de nitrógeno ha⁻¹, con y sin aplicación de *Azospirillum brasilense*, con el objetivo de recomendar una menor aplicación de fertilizantes inorgánicos que permita incrementar los ingresos de los agricultores del municipio de Huamixtitlán, estado de Guerrero, México.

1. Materiales y métodos

1.1. Localización del área de estudio

El presente estudio se realizó en el ciclo primavera-verano de 1992 en el municipio de Huamixtitlán, estado de Guerrero, ubicado a 17° 49' de latitud Norte y 98° 31' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. El clima de esta región es del

tipo Bs,(h)m(m)(e)g, definido como cálido-seco, con lluvias en verano, precipitación media anual de 779.6 mm y temperatura media anual de 25.2 °C (cuadro 1). La cabecera municipal se sitúa a una altitud de 1 125 m (García, 1988; Romero, 2009).

1.2. Material biológico

Se utilizaron tres cultivares de maíz, identificados como VS-535, H-507 y criollo veracruzano, los cuales presentan las características agronómicas que se muestran en el cuadro 2. Además se empleó *Azospirillum brasilense*, bacteria fijadora de nitrógeno atmosférico proporcionada por el Departamento de Investigaciones Microbiológicas del Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla.

1.3. Diseño y tamaño de la parcela experimental

Los 24 tratamientos considerados en el presente estudio, derivados de la combinación de VS-535, H-507 y criollo veracruzano con 0, 30, 60 y 90 kg de nitrógeno ha⁻¹ con y sin la aplicación de *Azospirillum brasilense* (0 y 280 g ha⁻¹ de ingrediente comercial), fueron evaluados en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la aleatorización de éstos en campo se hizo bajo un arreglo de parcelas subdivididas. Los tres cultivares de maíz se asignaron a la parcela grande (factor A), el nitrógeno se aplicó a la parcela mediana (factor B) y la inoculación bacteriana se anidó en la parcela chica. La unidad experimental tuvo cuatro surcos, pero la parcela útil constó de los dos centrales.

1.4. Conducción del experimento

Con tracción animal se formaron surcos de 0.80 m de ancho por 11.0 m de largo. El 28 de mayo se realizó la inoculación con *Azospirillum brasilense* (en un litro de agua se disolvió azúcar con la semilla para que se adhiriera la bacteria) y la siembra manual de los tres genotipos de maíz se hizo depositando tres semillas por golpe, empleando una distancia entre golpes de 0.80 m. La densidad de siembra fue de casi 47 000 plantas ha⁻¹. Para cada nivel de nitrógeno se adicionaron 60 kg de fósforo por ha⁻¹. El control de maleza en el experimento se hizo con tracción animal y manualmente, hasta los 60 días de la siembra. La cosecha del material experimental se realizó cuando las variedades alcanzaron la madurez fisiológica (Romero, 2009).

1.5. Registro de variables

Las variables registradas fueron rendimiento de grano por parcela, floración masculina (días desde la siembra hasta que las plantas en la parcela útil derramaron polen o presentaron estigmas visibles), días a madurez fisiológica (grano maduro), altura de planta (medida desde la base del

Cuadro 1. Datos de precipitación y temperatura para el ciclo primavera-verano de 1992, registrados en el municipio de Huamixtitlán, Guerrero.

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)
Enero	10.2	22.35
Febrero	1.0	23.04
Marzo	0.0	28.42
Abril	0.0	27.23
Mayo	30.4	27.82
Junio	31.9	28.00
Julio	107.6	25.52
Agosto	62.6	25.70
Septiembre	28.6	24.56
Octubre	4.0	24.55
Noviembre	13.4	23.50
Diciembre	0.0	22.31

Fuente: Romero (2009).

suelo hasta donde termina la espiga), altura de mazorca (medida desde la base del suelo hasta donde se inserta la mazorca principal), total de plantas en la parcela útil y plantas sin mazorca.

1.6. Análisis estadístico

Los datos registrados en el experimento fueron sometidos a un análisis de varianza, a la comparación de medias con la prueba de Tukey al nivel de significancia del 5%, y a un análisis de correlación lineal simple, como lo sugieren Gómez y Gómez (1984). El análisis de componentes principales se efectuó con la metodología propuesta por Sánchez (1995).

2. Resultados y discusión

2.1. Análisis de varianza

En el cuadro 3 se muestran los cuadrados medios y la significancia estadística de los valores de F para cada variable; los efectos entre genotipos de maíz (factor A) fueron significativos para rendimiento de grano (RG), floración masculina (DMF), madurez fisiológica (DMF), altura de planta (AP) y altura de mazorca (AM). También se detectaron diferencias significativas para nitrógeno (factor B) en DFM, DMF, AP y AM. En relación con *Azospirillum brasilense* (factor C), los efectos fueron significativos en RG, DFM y DMF; sólo en las interacciones BxC y AxBxC hubo diferencias significativas en DMF y AM.

Las diferencias significativas que se detectaron entre genotipos (Factor A) para DFM, DMF, AP, AM y RG podrían estar relacionadas con su estructura genética, debido a que en el experimento se evaluaron tres poblaciones genéticamente diferentes: VS-535, H-507 y criollo veracruzano. Estas diferencias también fueron señaladas en el cuadro 2,

donde también se puede observar que los tres genotipos se diferenciaron en estas variables y en rendimiento de grano por hectárea (SARH, 1990).

Las diferencias significativas que se observaron en el factor B para DFM, DMF, AP y AM están relacionadas con las cantidades de nitrógeno que se aplicaron, de 0 a 90 kg ha⁻¹, en el que se esperaba una mayor respuesta del cultivo en la dosis más alta.

La aplicación de *Azospirillum brasilense* (cuadro 3) contribuyó a la diferenciación del rendimiento de grano (RG) y del ciclo biológico (DFM y DMF), pero no tuvo efectos significativos sobre el resto de las variables. Los resultados anteriores confirman parcialmente las hipótesis de que existen diferencias entre genotipos, entre niveles de nitrógeno y entre ambas dosis de *Azospirillum brasilense*. En un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas el factor A se estima con menor precisión que los factores B y C y este último se estima con mayor precisión que B, debido a que tiene un mayor número de grados de libertad en el error experimental. La ausencia de interacciones significativas en la mayoría de las variables indica que, en general, los efectos de

Cuadro 2. Características de los genotipos de maíz evaluados en el presente estudio.

Características	Genotipos		
	Veracruzano	H-507	VS-535
Altura de planta (cm)	200 - 220	220 - 260	250 - 260
Madurez fisiológica (días)	135 - 150	130 - 150	115 - 120
Rendimiento (t ha ⁻¹)	4.0	7.0	6.0

Fuente: Romero (2009).

Cuadro 3. Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F del análisis de varianza para las variables registradas en tres genotipos de maíz evaluadas en cuatro dosis de nitrógeno; con y sin *Azospirillum brasilense*.

F.V.	G.L.	Variables evaluadas								
		RG	DFM	DMF	AP	AM	PV	PC	PT	
Repeticiones	2	0.07 ns	16.26ns	4.76 ns	0.02 ns	0.03 ns	2941932 ns	1705373 ns	13157182 ns	
Genotipos (A)	2	7.40 *	1874.0 **	23.92 **	3.84 **	2.41 **	3753844 ns	5344836 ns	132792324 *	
Error (a)	4	0.60	4.6	17.18	0.00	0.01	2820950	3255540	8626128	
Nitrógeno (B)	3	1.54 ns	29.5 *	75.27 *	0.01 **	0.22 **	1583579 ns	2994203 ns	12786624 ns	
A x B	6	0.33 ns	24.5 *	54.75 *	0.01 **	0.03 ns	1241935 ns	1460903 ns	8930509 ns	
Error (b)	18	1.14	9.0	18.65	0.00	0.03	1220924	1531660	5887538	
<i>Azospirillum</i> (C)	1	38.93 **	82.3 **	82.34 **	0.00 ns	0.00 ns	4311516 ns	759322 ns	512072 ns	
A x C	2	0.75 ns	7.3 ns	0.72 ns	0.00 ns	0.00 ns	2182295 ns	568190 ns	14846242 ns	
B x C	3	1.60 ns	5.2 ns	25.93 **	0.00 ns	0.00 ns	686160 ns	1401982 ns	3383655 ns	
AxBxC	6	0.27 ns	2.7 ns	3.42 ns	0.00 ns	0.02 **	497355 ns	443451 ns	14354973 ns	
Error (C)	24	0.71	2.8	3.97	0.00	0.00	1129831	1106993	6570498	
Media		4.62	67.5	104.73	3.04	1.33	2959	1586	40887	
C.V. (%)		18.2	2.4	1.9	1.1	4.6	51.6	66.3	6.2	

RG = rendimiento de grano; DFM = días a floración masculina; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta; AM = altura de mazorca; PV = plantas vanas; PC = plantas cuateras; PT = total de plantas

Figura 1. Rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) de tres variedades de maíz sembradas en cuatro dosis de nitrógeno ($kg\ ha^{-1}$). La barra representa el error estándar para la comparación de medias ($EE = 0.4092\ t\ por\ ha$).

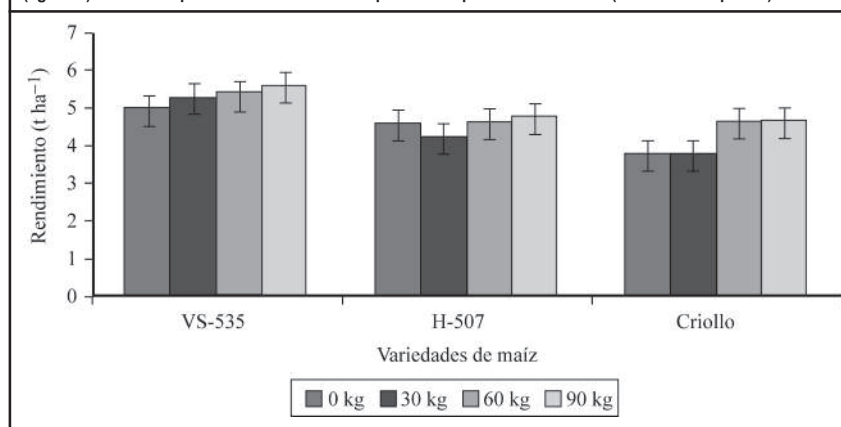
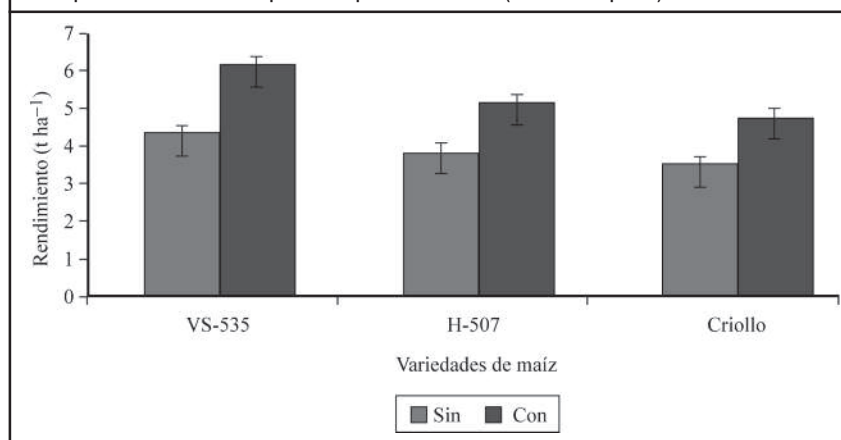


Figura 2. Rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) de tres variedades de maíz sin y con *Azospirillum brasilense*. La barra representa el error estándar para la comparación de medias ($EE = 0.2336\ t\ por\ ha$).



los factores A, B y C se pueden evaluar independientemente, por lo que la comparación de dos niveles cualesquiera dentro de cada uno de ellos se puede realizar confiablemente con la prueba de Tukey.

2.2. Comparación de medias

2.2.1. Genotipos de maíz (Factor A)

En el sintético VS-535 se registró el mayor rendimiento de grano ($5.23\ t\ ha^{-1}$); éste fue estadísticamente igual que H-507 ($4.48\ t\ ha^{-1}$) pero superó significativamente al criollo veracruzano ($4.15\ t\ ha^{-1}$). El rendimiento de grano del híbrido y del criollo fue igual estadísticamente (cuadro 4; figuras 1 y 2). Con base en la estructura genética de las tres poblaciones, se esperaba que el híbrido superara a los dos genotipos y que el sintético también superara al criollo, como se aprecia en el cuadro 2, donde se reporta que el rendimiento de estos tres genotipos, en el mismo orden, es de $7.0, 6.0$ y $4.0\ t\ ha^{-1}$ (SARH, 1990). En teoría, el híbrido supera a los sintéticos y a los criollos, porque explota mejor los efectos de heterosis en rendimiento y características de planta y mazorca, mientras que en los

Cuadro 4. Comparación de medias entre genotipos de maíz.

Niveles en A	Variables evaluadas							
	RG	DFM	DMF	AP	AM	PV	PC	PT
VS - 535	5.23 a	57.37 b	93.20 b	2.60 c	1.03 c	1704.6 a	1325.3 a	39969.1 b
H - 507	4.48 ab	73.04 a	110.45 a	3.15 b	1.30 b	1988.1 a	2130.8 a	39133.1 b
Criollo	4.15 b	72.29 a	110.54 a	3.38 a	1.66 a	2485.8 a	1301.9 a	43560.5 a
Tukey (0.05)	0.79	2.22	4.26	0.09	0.13	1728	1856.3	3021.7

RG = rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$); DFM = días a floración masculina; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta (m); AM = altura de mazorca (m); PV = plantas vanas; PC = plantas cuateras; PT = total de plantas.

Cuadro 5. Comparación de medias entre dosis de nitrógeno.

Niveles en B	Variables evaluadas							
	RG	DFM	DMF	AP	AM	PV	PC	PT
0	4.38 a	69.38 a	107.27 a	3.01 a	1.22 b	1704.4 a	2051.7 a	39624.7 a
30	4.36 a	66.50 b	105.38 ab	3.03 a	1.27 b	2304.2 a	1704.5 a	41350.4 a
60	4.81 a	67.50 ab	103.66 ab	3.06 a	1.37 ab	2304.3 a	1073.2 a	41256.3 a
90	4.93 a	66.88 ab	102.61 b	3.08 a	1.48 a	1925.1 a	1514.6 a	41318.8 a
Tukey (0.05)	1.00	2.82	4.06	0.06	0.18	1041	1165.9	2285.9

RG = rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$); DFM = días a floración masculina; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta (m); AM = altura de mazorca (m); PV = plantas vanas; PC = plantas cuateras; PT = plantas totales.

dos genotipos de polinización libre se explotan mejor los efectos aditivos, los cuales confieren una mejor adaptación en ambientes heterogéneos pero también son responsables de una menor productividad en cultivos alógamos, como el maíz (González *et al.*, 2006).

Alcíbar *et al.* (1999) evaluaron tres variedades de maíz y concluyeron que éstas se diferenciaron estadísticamente en diámetro de mazorca, número de hileras de grano, altura de planta y peso de grano por planta. Los rendimientos de grano en los cultivares Jiquipilco, H-28 y H-30 fueron de 3.48, 3.47 y 3.56 t ha⁻¹, respectivamente.

En el cuadro 4 se puede observar que el sintético VS-535 tuvo la menor duración del ciclo biológico (57 y 93 días a floración masculina y madurez fisiológica) y difirió estadísticamente de H-507 (73 y 110 días a floración masculina y madurez) y del criollo (72 y 110 días a floración masculina y madurez). Estos resultados difieren de los presentados en el cuadro 2, donde se puede observar que el sintético es más precoz que el criollo veracruzano y H-507, pero el intervalo en el número de días a madurez fisiológica, en el mismo orden, fue menor: 115-120, 135-150 y 130-150 (SARH, 1990). Estos resultados podrían estar relacionados con el clima presente en el año de evaluación y con la localidad donde se realizó el experimento.

En el criollo se registraron las mayores alturas de planta y mazorca (3.38 y 1.66 m, respectivamente) y éste difirió significativamente de H-507 (3.15 y 1.30 m) y de VS-535 (2.60 y 1.03 m); el híbrido y el criollo también difirieron estadísticamente (cuadro 4). Los resultados reportados por la SARH (1990) coinciden parcialmente con los observados en el presente estudio; el sintético presentó una altura de planta dentro del intervalo que se presenta en el cuadro 2 (250 a 260 cm), pero el que se registró en el criollo y en H-507 es inferior en más de 50 cm. Estos resultados podrían estar relacionados con el año de evaluación y la localidad donde se condujo el experimento.

En relación con las variables plantas vanas (PV), plantas cuateras (PC) y plantas totales (PT), en general no se detectaron diferencias significativas entre genotipos de maíz (cuadro 4). Estas variables fueron registradas para determinar si en el genotipo criollo había un mayor número de plantas con esterilidad femenina. En teoría se esperaba

que el híbrido tuviera un menor número de plantas vanas y un mayor número de plantas cuateras que el sintético y el criollo veracruzano, debido a que durante el proceso de endogamia, se eligen líneas con una o más mazorcas y sin problemas de esterilidad femenina.

2.2.2. Nitrógeno (Factor B)

El nitrógeno sólo tuvo efectos significativos ($P < 0.05$) en floración (DFM), madurez (DMF) y altura de mazorca (AM) (cuadro 5, figura 1). En DFM la mayor duración del ciclo biológico (69 días) se registró en 0 kg de N ha⁻¹ y ésta sólo difirió estadísticamente de 30 kg (66 días). En DMF, en 0 kg de N ha⁻¹ se observó la mayor duración del ciclo biológico (107 días), pero ésta sólo difirió significativamente de 90 kg de N ha⁻¹ (102 días). En AM en 90 kg de N ha⁻¹ se registró el mayor promedio aritmético (1.48 m) y ésta sólo difirió estadísticamente de 0 y 30 kg (1.22 y 1.27 m, respectivamente). Estos resultados sugieren que no hubo deficiencias de este macroelemento, pero los riegos de auxilio del tipo rodado que se aplicaron cada 20 días quizá contribuyeron a la lixiviación parcial del nitrógeno en el suelo. El factor compensatorio en el experimento podría ser *Azospirillum brasilense*, que se asoció positivamente con cada uno de los niveles de nitrógeno aplicados e incrementó el rendimiento de grano y afectó positivamente la expresión fenotípica del resto de las variables (figuras 3 y 4).

Las dosis de 0, 30, 60 y 90 kg de N ha⁻¹ (fósforo constante, 60 kg ha⁻¹) no variaron significativamente el rendimiento de grano (4.36, 4.81, 4.93 y 4.38 t ha⁻¹, respectivamente); aun cuando no se realizó un análisis económico se infiere que la diferencia entre la dosis más pequeña y más grande (500 kg de maíz) no justificó la aplicación de 90 kg de este nutriente (cuadro 5, figura 1).

Rodríguez (1996) mencionó que para producir 12.0 t ha⁻¹ de maíz para grano, sin considerar pérdidas de macroelementos, el cultivo debe extraer del suelo 170 kg de N, 100 kg de P y 65 kg de K. Así, al considerar 4.62 t ha⁻¹, el rendimiento de grano promedio en el presente estudio, se requerirán al menos de 65.0 y 39.0 kg de N y P, respectivamente. Estos valores confirman la suposición de que *A. brasilense* compensó la posible deficiencia que pudo existir de nitrógeno en el experimento, específicamente en los niveles de 0, 30 y 60 kg ha⁻¹.

Cuadro 6. Efecto de *Azospirillum brasilense* sobre las variables registradas en tres genotipos de maíz y cuatro dosis de nitrógeno.

Niveles en C	Variables evaluadas						
	RG	DFM	DMF	AP	AM	PV	PT
1. Sin	3.89 b	68.63 a	105.80 a	3.04 a	1.33 a	1814.8 a	40971.9 a
2. Con	5.36 a	66.50 b	103.66 b	3.05 a	1.34 a	2304.2 a	40803.2 a
Tukey (0.05)	0.411	0.81	0.96	0.01	0.03	517.08	1247

RG = rendimiento de grano (t ha⁻¹); DFM = días a floración masculina; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta (m); AM = altura de mazorca (m); PV = plantas vanas; PC = plantas cuateras; PT = plantas totales.

Alcíbar *et al.* (1999) observaron que la fertilización inorgánica originó diferencias significativas en longitud, diámetro, peso de olote y de grano por mazorca, alturas de planta y mazorca y rendimiento de grano, efectos que se atribuyeron principalmente al nitrógeno (40, 80 y 120 unidades ha⁻¹), debido a que el fósforo fue constante (60 unidades ha⁻¹) y no hubo problemas de precipitación pluvial (860 mm).

2.2.3. *Azospirillum brasilense* (Factor C)

La inoculación con esta bacteria incrementó el rendimiento de grano (1.47 t ha⁻¹) y disminuyó la duración del ciclo biológico del cultivo (2 días en DFM y DMF). Este incremento en la producción de grano promedio en relación con el testigo no inoculado representó un ganancia del 37.7% (cuadro 6; figuras 3 y 4), pero ésta fue disminuyendo al incrementarse la dosis de nitrógeno, por lo que se deduce que hubo menor eficiencia de *Azospirillum brasilense* con nitrógeno alto.

García-Olivares *et al.* (2007) evaluaron los efectos de *Azospirillum brasilense* en el crecimiento y rendimiento de grano del maíz y observaron que la cepa CBG-497 incrementó significativamente la producción de biomasa (20 a 90%) en tres cultivares en comparación con el testigo no inoculado. En campo, en el rendimiento de grano y de forraje no hubo diferencias significativas entre la aplicación de biofertilizantes basados en cepas nativas de *A. brasilense* y la fertilización química, pero la aplicación de biofertilizantes incrementó la rentabilidad del maíz en un 36% al reducir los costos de fertilización.

Los efectos positivos de esta bacteria en varios cultivos se han atribuido principalmente al mejoramiento en el desarrollo de la raíz y al incremento subsecuente en la tasa de asimilación de agua y a la utilización eficiente de minerales del suelo (Döbbelaere *et al.*, 2002). También se ha considerado que la síntesis de altas cantidades de auxinas *in vitro* se considera un parámetro útil para la identificación y elección de cepas nativas de *A. brasilense* para la producción de biofertilizantes en la agricultura, debido a que promueven el crecimiento vegetal (García-Olivares *et al.*, 2007). La eficiencia de *A. brasilense* también podría estar relacionada con su origen, debido a que las cepas provienen del estado de Puebla, región colindante con el municipio del estado de Guerrero donde se realizó el presente estudio; esta respuesta favorable también podría estar asociada a una interacción positiva entre la bacteria y factores de clima y suelo, principalmente. García-Olivares *et al.* (2007) comentaron que los factores como precipitación pluvial, temperatura, características físico-químicas del suelo, la presencia de microorganismos en la rizósfera, el genotipo del hospedante y la capacidad de la bacteria para establecerse y para competir con la microflora nativa, son los responsables de causar diversidad en la eficiencia bioestimulante de estos microorganismos.

Figura 3. Efecto de la dosis de nitrógeno sin y con *Azospirillum brasilense* en el rendimiento de grano (t ha⁻¹) del maíz. La barra representa el error estándar para la comparación de medias (EE = 0.3205 t por ha).

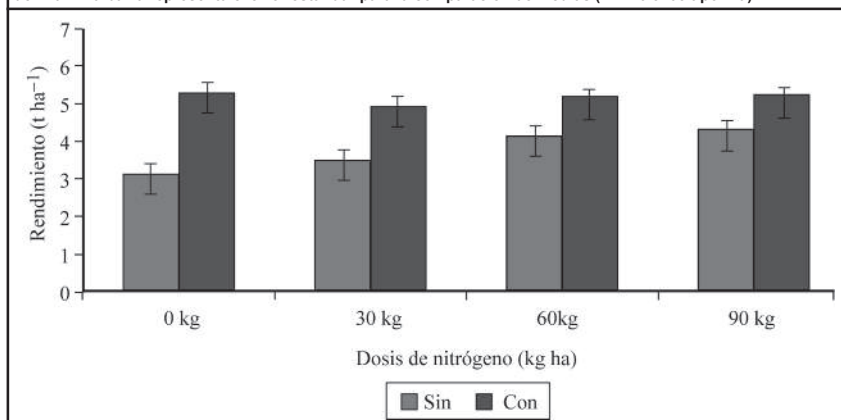
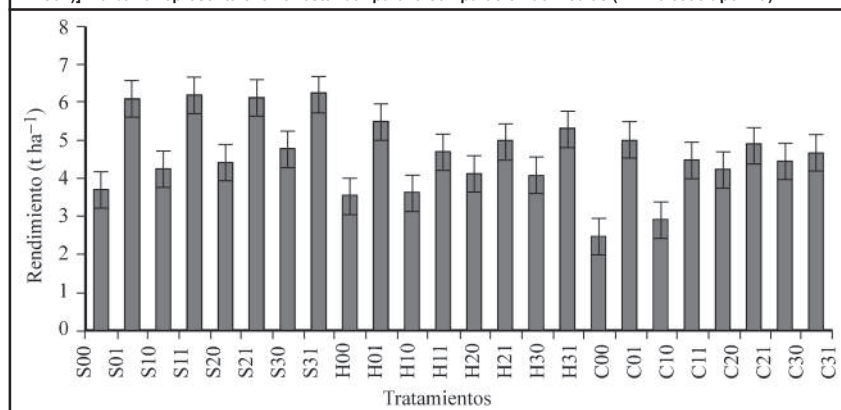


Figura 4. Rendimiento de grano (t ha⁻¹) asociado a 24 tratamientos [combinación de variedad (S = VS-535; H = H-507; C = Criollo), nitrógeno (0 = 0 kg; 1=30 kg; 2 = 60 kg; 3 = 90 kg) y *Azospirillum brasilense* (0 = sin y 1 = con)]. La barra representa el error estándar para la comparación de medias (EE = 0.5393 t por ha).



biofertilizantes en la agricultura, debido a que promueven el crecimiento vegetal (García-Olivares *et al.*, 2007). La eficiencia de *A. brasilense* también podría estar relacionada con su origen, debido a que las cepas provienen del estado de Puebla, región colindante con el municipio del estado de Guerrero donde se realizó el presente estudio; esta respuesta favorable también podría estar asociada a una interacción positiva entre la bacteria y factores de clima y suelo, principalmente. García-Olivares *et al.* (2007) comentaron que los factores como precipitación pluvial, temperatura, características físico-químicas del suelo, la presencia de microorganismos en la rizósfera, el genotipo del hospedante y la capacidad de la bacteria para establecerse y para competir con la microflora nativa, son los responsables de causar diversidad en la eficiencia bioestimulante de estos microorganismos.

3. Análisis de componentes principales

Los componentes principales 1 (51.2%) y 2 (21.0%) explicaron el 72.2% de la

variación total original de los 24 tratamientos (combinación de genotipos, dosis de nitrógeno y *A. brasilense*), por lo que las correlaciones aproximadas que se observaron en el biplot de la figura 5 se pueden interpretar confiablemente (Sánchez, 1995).

Los resultados que se observaron en el biplot confirman los que se detectaron en las figuras 1 a 4: VS-535 fue el mejor cultivar; este sintético sembrado con 90 kg N ha⁻¹ e inoculado con *A. brasilense* a 280 g ha⁻¹ de ingrediente comercial (tratamiento 8) fue el que produjo el mayor rendimiento de grano (6.26 t ha⁻¹). Este sintético fue más precoz y tuvo menor altura de planta y mazorca y menos esterilidad femenina.

Conclusiones

1. Los tres genotipos de maíz se diferenciaron en rendimiento de grano, floración masculina, madurez fisiológica y altura de planta y mazorca.

2. Las dosis de nitrógeno de 0, 30, 60 y 90 kg ha⁻¹ no aumentaron significativamente el rendimiento de grano (4.38, 4.36, 4.81 y 4.93 t ha⁻¹, respectivamente).

3. La inoculación con *Azospirillum brasilense* sólo incrementó el rendimiento de grano (1.47 t ha⁻¹) y disminuyó la duración del ciclo biológico del cultivo (2 días en floración masculina y madurez fisiológica).

4. VS-535 (5.23 t ha⁻¹) y H-507 (4.48 t ha⁻¹) rindieron estadísticamente lo mismo, pero el primero superó significativamente al criollo veracruzano (4.15 t ha⁻¹). El sintético tuvo el menor ciclo biológico (57 y 93 días a floración masculina y madurez fisiológica).

5. El rendimiento de grano disminuyó significativamente al aumentar el número de días a floración masculina, madurez fisiológica y la altura de planta.

6. La combinación de VS-535, 60 kg de nitrógeno ha⁻¹ y *Azospirillum brasilense* podría ser una alternativa viable para que los agricultores incrementen el rendimiento de grano.

Análisis prospectivo

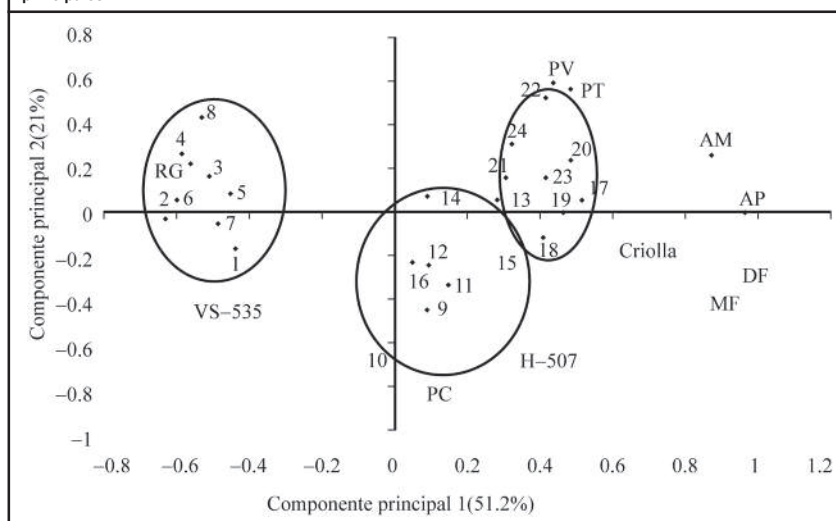
La variabilidad genética que existe en maíz (*Zea mays* L.) en México es muy amplia, quizás porque nuestro país ha sido considerado como el centro de

origen primario y de diversificación de este cereal. Desde una perspectiva de la teoría del mejoramiento genético de los cultivos recomendables comercialmente, los híbridos de maíz tienen mayor potencial de rendimiento de grano que las variedades de polinización libre, porque explotan mejor los efectos aditivos y no aditivos de la varianza genética en ambientes favorables. En el presente estudio la producción de grano de la variedad sintética fue mayor que la del híbrido y la del criollo. Las condiciones ambientales del sitio donde se realizan los experimentos y el manejo agronómico que se proporciona a éstos también es muy importante para mejorar el potencial genético del maíz.

En el presente estudio se utilizaron dosis de nitrógeno bajas (0 a 90 kg ha⁻¹), pero la producción de grano de los híbridos, en comparación con las variedades de polinización libre, se incrementa al aumentar las dosis de este macroelemento (90 a 180 kg ha⁻¹). En los últimos años se ha incrementado significativamente el costo de los fertilizantes inorgánicos y los ingresos de los agricultores han disminuido al aumentar los costos de producción del cultivo. El uso de biofertilizantes como *Azospirillum brasilense*, podría ser una excelente opción en los agrosistemas de temporal o secano para mejorar y recuperar la fertilidad de los suelos y para disminuir las cantidades de nitrógeno que el maíz requiere para producir rendimientos de grano comercialmente redituables. Adicionalmente, la sustitución parcial de los fertilizantes inorgánicos por biofertilizantes podría disminuir significativamente la contaminación del ambiente y del agua del subsuelo.



Figura 5. Biplot entre tratamientos (1 = VS-535 con 0 kg por ha y sin *Azospirillum*,..., 24 = criollo con 90 kg por ha y con *Azospirillum*) y variables (RG, PC, PV, PT, AM, AP, DF, MF) para los dos primeros componentes principales.



- Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato (2000). "Biofertilizantes: importancia y utilización en la agricultura", *Rev. Agric. Téc. México*, Vol. 26.
- Alcibar E, J.; D. J. Pérez y A. González H. (1999). "Efecto de la fertilización y densidad de población en tres variedades de maíz (*Zea mays* L.)", *Revista Ciencias Agrícolas Informa*. 12.
- Döbbelaere, S.; A. Croonenborghs; A. Thys; D. Ptacek; Y. Okon y J. Vanderleyen (2002). "Effect of Inoculation with Wild Type *Azospirillum Brasilense* and A. Irakense Strains on Development and Nitrogen Uptake of Spring Wheat and Grain Maize", *Biol. Fertil Soils*. 36
- García, E. (1988). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. UNAM. México.
- García-Olivares, J. G.; V. R. Moreno-Medina; I. C. Rodríguez-Luna; A. Mendoza-Herrera y N. Mayek-Pérez (2007). "Efecto de cepas de *Azospirillum brasilense* en el crecimiento y rendimiento de grano del maíz", *Rev. Fitotec. México*. Vol. 30(3).
- Gomez, K. A. y A. A. Gomez (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2a. Ed. Singapore, John Wiley and Sons.
- González, H. A.; C. J. Sahagún y L. D. J. Pérez (2006). "Estudio de ocho líneas de maíz en un experimento dialélico incompleto", *Revista Ciencias Agrícolas Informa*. Vol. 16.
- Holguín, G.; Y. Bashan; M. E., Puente; A. Carrillo; G. Bethlenfalvay; A. Rojas; P. Vázquez; G. Toledo; M. Bacilio-Jiménez; B. R. Glick; L.E. González de-Bashan; V. Lebsky; M. Moreno y J. P. Hernández (2003). "Promoción del crecimiento en plantas por bacterias de la rizósfera: avances de investigación", *Rev. Agric. Téc. Méx.* Vol. 29.
- Irizar, G.M.; P. Vargas; D. Garza; C. Tut; M. Rojas; A. Trujillo; R. García; D. Aguirre; J. Martínez; S. Alvarado; O. Grageda; J. Valero y J. Aguirre (2003). "Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México", *Rev. Agric. Téc. México*, Vol. 29.
- Rodríguez, S. F. (1996). *Fertilizantes. Nutrición vegetal*. AGT Editor s. A. Tercera reimpresión. México, D. F.
- Romero, S. H. (2009). *Biofertilización con *Azospirillum spp* en tres genotipos de maíz evaluados con cuatro niveles de nitrógeno*. Tesis de Licenciatura. Especialidad de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México.
- Sánchez, G. J. J. (1995). "El análisis biplot en clasificación", *Rev. Fitotec. Mex.* 18.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos) (1990). *El Cultivo del Maíz en el Estado de Guerrero, México*. Folleto Técnico.