

PRODUCTIVIDAD DE SORGO EN CAMPO ASOCIADA CON MICORRIZA ARBUSCULAR Y *Azospirillum brasilense*

Sorghum productivity in the field associated with arbuscular mycorrhiza and *Azospirillum brasilense*

A Díaz-Franco ✉, C Jacques-Hernández, MA Peña del Río

(ADF) Campo Experimental Río Bravo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carr. Matamoros-Reynosa, km 61. Apartado Postal 172, Río Bravo, Tamaulipas, México, 88900. diaz.arturo@inifap.gob.mx
(CJH) Centro de Biotecnología Genómica, Instituto Politécnico Nacional. Reynosa, Tamaulipas México
(MPR) Campo Experimental General Terán, INIFAP, General Terán, Nuevo León, México

Artículo recibido: 25 de octubre de 2006, **aceptado:** 1 de octubre de 2008

RESUMEN. En el contexto de agricultura sostenible, los microorganismos benéficos representan un componente biotecnológico importante. En este estudio se evaluó el efecto de la inoculación con el hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* y la rizobacteria promotora de crecimiento *Azospirillum brasilense* en la productividad de sorgo (cv. DK-52) en condiciones semiáridas y de secano. En 2002 se comparó la respuesta de semilla de sorgo inoculada con *G. intraradices*, *A. brasilense*, y combinada y en 2003 se incluyó además, una multicepa de *A. brasilense*. Las características de planta y de grano fueron medidas. En 2002 los endófitos no influyeron significativamente (ANDEVA; $p = 0.05$) en la altura de planta. Pero el rendimiento y peso volumétrico de grano se incrementó de manera semejante con la inoculación individual de *G. intraradices* ó *A. brasilense* (ANDEVA; $p = 0.05$ y 0.01). En 2003 no hubo efectos en las características de planta y grano por la multicepa de *A. brasilense* (ANDEVA; $p = 0.05$). El hongo micorrízico arbuscular *G. intraradices* aumentó la altura de planta, la biomasa seca foliar y radical, la longitud de la panoja y el contenido de proteína en el grano (ANDEVA; $p \leq 0.05$). El rendimiento de grano fue superior y semejante con *G. intraradices* ó *A. brasilense* (ANDEVA; $p = 0.05$). El promedio de los dos años indicó que la mayor altura de planta se registró con *G. intraradices* (107.5 cm) (ANDEVA; $p = 0.05$), en tanto que el aumento en el rendimiento de grano fue similar con *G. intraradices* y *A. brasilense* (ANDEVA; $p = 0.01$), el que en promedio representó 20.5% sobre el testigo. La respuesta del sorgo a la combinación simultánea de *G. intraradices* y *A. brasilense* resultó ineficiente en 2002 y 2003 (ANDEVA; $p = 0.05$). La inoculación independiente de los endófitos demostró viabilidad para incrementar la productividad del sorgo en condiciones semiáridas y de secano.

Palabras clave: Microorganismos benéficos, *Sorghum bicolor*, rendimiento.

ABSTRACT. In the context of sustainable agriculture, beneficial microorganisms represent an important biotechnological component. In this study, the effect of inoculation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and the plant growth promoting rhizobacterium *Azospirillum brasilense* on sorghum productivity (cv. DK-52) in semiarid-dryland conditions was evaluated. In 2002, the responses of sorghum seeds inoculated with *G. intraradices*, *A. brasilense* and both were compared, and a multi isolate of *A. brasilense* was included in 2003. The characteristics of the plants and grains were measured. In 2002, the endophytes had no significant influence (ANOVA; $p = 0.05$) on the height of the plant, although the yield and volumetric weight of the grain increased as did the individual *G. intraradices* or *A. brasilense* inoculations (ANOVA; $p = 0.05$ and 0.01). In 2003, the multi isolate of *A. brasilense* had no effect on the plant and grain characteristics (ANOVA; $p = 0.05$). The arbuscular mycorrhizal fungus *G. intraradices* increased plant height, leaf and root dry biomass, panicle length, and protein content in the grain (ANOVA; $p \leq 0.05$). The grain yield was greater and similar with *G. intraradices* or *A. brasilense* (ANOVA; $p = 0.05$). The average for the two years indicated that a greater plant height was obtained with *G. intraradices* (107.5 cm) (ANOVA; $p = 0.05$), whereas the increase in grain yield was similar with *G. intraradices* and *A. brasilense* (ANOVA; $p = 0.01$) and it represented on average 20.5% over the control. The response of the sorghum to the simultaneous combination of *G. intraradices* and

A. brasilense was inefficient in 2002 and 2003 (ANOVA; $p = 0.05$). The independent inoculation of the endophytes showed it is possible to increase sorghum productivity in semiarid-dryland conditions.

Key words: Beneficial microorganisms, *Sorghum bicolor*, yield.

INTRODUCCIÓN

El norte de Tamaulipas, México, es una planicie semiárida, donde el sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, se ha cultivado en una superficie anual de 600 a 700 mil hectáreas, principalmente de temporal o seco, con un rendimiento medio de grano de 2.4 t ha^{-1} (Williams-Alanís *et al.* 2006). Este rendimiento ha representado una rentabilidad de producción crítica, con una relación beneficio-costado de 1.3 (Salinas-García 2002). La baja productividad, entre otras causas, se ha derivado de la progresiva degradación de los agroecosistemas, lo cual ha originado graves problemas de erosión y desertificación (Díaz-Moreno *et al.* 2007). En general los suelos de esa región son pobres en materia orgánica y deficientes de nitrógeno y fósforo (Garza-Cano *et al.* 2005; Díaz-Franco *et al.* 2005; Salinas-García *et al.* 2006). No obstante las necesidades de esos elementos, la fertilización química es una práctica poco común debido a la errática humedad en el suelo, así como el costo que representa (Díaz-Moreno *et al.* 2007).

Ante ese escenario, es urgente el desarrollo de prácticas agronómicas que eleven la rentabilidad de la producción de sorgo y promuevan un equilibrio agroecológico. Lo anterior podría conducir a una agricultura sostenible. Dentro de ese contexto, se le ha puesto especial interés al uso de microorganismos benéficos del suelo a fin de mejorar el balance biológico en el mismo y reducir el uso de fertilizantes químicos y de otros agroquímicos en los sistemas de producción (Aguirre-Medina 2008; Olalde-Portugal & Serratos 2008). Los microorganismos a través de su capacidad simbiótica y las numerosas actividades que realizan en general, inducen a una mayor productividad de los cultivos (Dobbelaere *et al.* 2001; Irizar *et al.* 2003; Aguirre-Medina 2008).

La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares ha mejorado la productividad de diversos cultivos en condiciones de estrés hídrico (Al-Karaki & Clark 1998; Kaya *et al.* 2003; Al-Karaki *et al.* 2004;

Díaz-Moreno *et al.* 2007). El impacto de la colonización de hongos micorrízicos arbusculares se ha manifestado en un mejor aprovechamiento de agua y de los nutrientes inmóviles del suelo como fósforo, zinc y cobre, en el incremento de longitud y profundidad radical y el desarrollo de hifas externas. Además, la colonización de hongos micorrízicos arbusculares ha favorecido la acción protectora contra algunos patógenos del suelo (Alarcón & Ferrera-Cerrato 2000; Jeffries *et al.* 2003).

La rizobacteria promotora del crecimiento *Azospirillum brasilense* Terrand, Krieg et Dobereiner, ha incrementado la productividad de diversos cultivos en ambientes de seco (Dobbelaere *et al.* 2001; Irizar *et al.* 2003; Loredó-Ostí *et al.* 2004; Díaz-Franco *et al.* 2005). Lo anterior se debe a las actividades biosintéticas de *A. brasilense*, manifestadas en su capacidad de fijar nitrógeno, de solubilizar el fósforo, de producir sideróforos y de sintetizar fitohormonas y enzimas que regulan los niveles de las enzimas (Martínez *et al.* 2003; Loredó-Ostí *et al.* 2004). La producción de auxinas ha aumentado el número y la longitud de raíces adventicias y su conductividad hidráulica en plantas de sorgo bajo estrés hídrico (Sarig *et al.* 1992). El efecto de *A. brasilense* en la morfología de la raíz depende del genotipo y de la concentración de bacterias, cuyo número óptimo oscila entre 10^5 y 10^7 bacterias por semilla (Dobbelaere *et al.* 2002). En condiciones semiáridas, esta rizobacteria promotora del crecimiento, *A. brasilense*, incrementó el rendimiento de grano de sorgo entre 5 y 23 % (Mendoza-Herrera *et al.* 2008).

La combinación simultánea de rizobacterias promotoras del crecimiento y hongos micorrízicos arbusculares han inducido sinergismo, que se ha reflejado en un incremento del crecimiento, del contenido de fósforo en las plantas y de la producción, comparadas con las inoculadas por separado (Bashan *et al.* 1996; Aguirre-Medina 2008; Olalde-Portugal y Serratos 2008). Por lo que el propósito del presente estudio fue evaluar el efecto de la inocu-

lación simultánea del hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* Schenck et Smith y de la rizobacteria promotora del crecimiento *A. brasilense* en la productividad de sorgo en condiciones semiáridas de secano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidades y características del suelo

Dos experimentos de campo se condujeron en las localidades de secano "Goliat", (25° 55' N, 98° 23' O, 36 msnm) en Valle Hermoso en 2002 y "El Vaso" (25° 54' N, 97° 49' O, 30 msnm) en Matamoros, Tamaulipas en 2003. El muestreo de suelo de cada sitio se hizo en presiembra a 30 cm de profundidad. Las características físicas y químicas en "Goliat" fueron: pH = 8.1, conductividad eléctrica = 0.9 mS cm⁻¹, materia orgánica = 1.9%; N = 27 mg kg⁻¹, P = 11.3 mg kg⁻¹, K = 543 mg kg⁻¹ (N-P-K disponibles) y de textura migajón arcillo arenosa. Según la clasificación regional, estos suelos corresponden a la Clase I (Durán-Arce 1992) y son de calidad para áreas de riego, con eficiente permeabilidad y drenaje de dos a cinco días. En "El Vaso" fueron: pH = 8.0; conductividad eléctrica = 0.8 mS cm⁻¹; materia orgánica = 1.6%; N = 24 mg kg⁻¹; P = 12.4 mg kg⁻¹; K = 468 mg kg⁻¹; y de textura arcillosa. Durán-Arce (1992) los clasificó como suelos Clase II y tienen permeabilidad lenta y pobre drenaje (de cinco a 15 días).

Especies microbianas

La cepa regional del hongo micorrízico arbuscular *G. intraradices* se propagó en el Campo Experimental General Terán del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), General Terán, Nuevo León, mediante el sistema de camas reproductoras (Durán-Prado *et al.* 2001) y cuyo hospedero fue pasto Sudán *Urochloa brizantha* (C. Hochstetter ex A. Rich.) R. Webster (Anonymous 2008). El sustrato triturado obtenido en la producción del hongo micorrízico arbuscular contenía una mezcla de raíces (con 85 % de colonización micorrízica) y suelo con no menos de 400 esporas/g. El formulado de *A. brasilense* fue preparado con cepas nativas de la región en turba como

materia inerte, con una densidad bacteriana suficiente para tener de 1 x 10⁶ UFC por semilla. Este formulado se hizo en el Centro de Biotecnología Genómica del Instituto Politécnico Nacional, Reynosa, Tamaulipas. La cepa CBG-497 se utilizó individualmente y en un formulado multicepa que incluyó las cepas BV-112, BV-191, BV-180, BV-181 y CBG-497 (Mendoza-Herrera *et al.* 2008).

Ensayos y prácticas culturales

Ensayo en 2002

En el estudio se utilizó la semilla del híbrido de sorgo para grano 'DK-52', la cual se sembró el 27 de enero de 2002 con humedad residual pluvial. El diseño experimental incluyó cuatro tratamientos con cuatro repeticiones. El tamaño de la parcela fue de cuatro surcos de 0.83 m y 6 m de longitud. La densidad de población se ajustó a 20 plantas/m lineal (≈ 164 000 plantas/ha). Dado que la fertilización química es una práctica poco común, no se adicionaron fertilizantes inorgánicos. Otras prácticas agronómicas como cultivos y control fitosanitario se siguieron según las recomendaciones locales (Rosales-Robles *et al.* 2005).

Los tratamientos considerados fueron: a) la inoculación de semilla de sorgo con el hongo micorrízico arbuscular *G. intraradices* (Gi), a razón de 1 kg de sustrato micorrízico en la semilla utilizada para una hectárea (7 kg), mezcla hecha con 60 ml de carboxi metil celulosa como adherente y 500 ml de agua (Díaz-Moreno *et al.* 2007), b) la inoculación de la semilla con la rizobacteria promotora del crecimiento *A. brasilense* (Ab), a razón de 0.4 kg de turba en la misma cantidad de semilla (Mendoza-Herrera *et al.* 2008) y c) inoculación combinada en la semilla Gi + Ab; y d) testigo absoluto, semilla sin inoculante.

Ensayo en 2003

El experimento se sembró con humedad residual pluvial el 28 de enero de 2003 y con el mismo híbrido de sorgo utilizado en el año anterior. En este estudio se incluyeron cinco tratamientos con cuatro repeticiones, que consistieron en: a) la inoculación de semilla de sorgo con el hongo micorrízico arbus-

Tabla 1. Respuesta del sorgo 'DK-52' a la inoculación con microsimbiontes. Ensayo 2002. Promedios unidos con la misma letra son semejantes (Tukey; $p = 0.05$); NS, *, ** = no significancia y significancia en el nivel de $p = 0.05$ ó 0.01 , respectivamente.

Table 1. 'DK-52' sorghum response to inoculation with microsymbionts. 2002 trial. Means followed by the same letter are similar (Tukey; $p = 0.05$). NS, *, ** = non significant and significant at level $p = 0.05$ or 0.01 , respectively.

Tratamientos	Altura de planta (cm)	Grano	
		Rendimiento (kg ha^{-1})	Peso volumétrico (g)
<i>G. intraradices</i> (Gi)	105	2 875 ^a	78.2 ^a
<i>A. brasilense</i> (Ab)	101	2 803 ^a	78.1 ^a
Gi + Ab	102	2 626 ^{ab}	77.4 ^a
Testigo	100	2 190 ^c	74.5 ^b
Significancia F	NS	*	**
Coefficiente de variación (%)	8.5	16.2	6.8

cular *G. intraradices* (Gi), b) con la rizobacteria promotora del crecimiento *A. brasilense* (Ab), c) inoculación combinada Gi + Ab, de la forma descrita anteriormente, d) inoculación con la multicepa de *A. brasilense* (misma dosis utilizada) y e) el testigo absoluto con semilla sin inoculante.

Las dimensiones de las parcelas y la densidad de población fueron las mismas que el experimento del año anterior. Igualmente, no hubo fertilización química y se siguieron las indicaciones locales de Rosales-Robles *et al.* (2005) como prácticas agronómicas para sorgo.

Variables de respuesta y análisis estadísticos

En el ensayo de 2002 se midió la altura de planta, el rendimiento de grano y el peso volumétrico del grano. En el ensayo de 2003, se midieron los tres parámetros del experimento anterior más la biomasa foliar (incluyendo tallo) y radical, la longitud de la panoja y el contenido de proteína en el grano. En el estado de madurez fisiológica del sorgo se midió la altura y la longitud de la panoja en 10 plantas seleccionadas al azar dentro de los surcos centrales de cada parcela. De esas mismas plantas se midió la biomasa foliar y radical (peso seco en gramos) de la raíz lavada. Las plantas se sacaron con pala al excavar el volumen de suelo debajo de la planta (≈ 40 cm) (Al-Karaki *et al.* 2004). El rendimiento de grano (kg ha^{-1}) se estimó de todas las panojas (plantas) comprendidas en el segmento central de 5 m y dentro de los surcos centrales de cada parcela. El rendimiento de grano se estimó a 14% de humedad, proveniente de panojas secadas al sol y

trilladas. De la semilla procedente de cada parcela

se hizo un submuestreo para la medición del peso volumétrico y para la determinación del porcentaje de contenido de proteína, cuantificado de 20 g mediante el método de Kjeldah.

Los ensayos se analizaron estadística e independientemente para cada año en un diseño de bloques al azar y la comparación entre las medias fue a través de Tukey ($p = 0.05$). Con los tratamientos iguales, estos son *G. intraradices*, *A. brasilense*, la combinación Gi + Ab y el testigo absoluto, se realizó un análisis combinado de los dos ensayos con los caracteres de altura de planta y el rendimiento de grano. Los datos se procesaron mediante el programa Statgraphics Plus (Anonymous 1997).

RESULTADOS

Ensayo de 2002

La precipitación acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 93 mm. Los tratamientos con microsimbiontes impactaron significativamente en el rendimiento de grano y en el peso volumétrico de sorgo (Tabla 1). Aunque la altura de planta con la inoculación de *G. intraradices* fue 5 cm superior con relación al testigo, no se observaron diferencias significativas (Tabla 1). Para rendimiento de grano y peso volumétrico se detectaron diferencias significativas entre tratamientos (ANDEVA; $p = 0.05$ y 0.01 , respectivamente), donde los tratamientos con inoculantes superaron al testigo (Tabla 1). La acción combinada de ambos simbioses no manifestó

Tabla 2. Características de planta (altura en cm) y productividad (longitud de panoja en cm) del sorgo 'DK-52' inoculado con microsimbiontes. Ensayo 2003. Promedios unidos con la misma letra son semejantes (Tukey; $p = 0.05$); *, ** = significancia en el ámbito de $p = 0.05$ ó 0.01 , respectivamente.

Table 2. Plant characteristics (height in cm) and productivity (panicle length in cm) of 'DK-52' sorghum inoculated with microsymbionts. 2003 trial. Means followed by the same letter are similar (Tukey; $p = 0.05$). *, ** = significant at level $p = 0.05$ or 0.01 , respectively.

Tratamientos	Altura planta (cm)	Biomasa (g)		Longitud panoja (cm)	Grano	
		Foliar	Radical		Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Proteína (%)
<i>G. intraradices</i> (Gi)	110 ^a	130 ^a	14.7 ^a	22.7 ^a	4 089 ^a	10 ^a
<i>A. brasilense</i> (Ab)	103 ^b	104 ^b	10.4 ^b	21.2 ^{ab}	3 971 ^a	8.8 ^b
Gi + Ab	103 ^b	102 ^b	12.1 ^b	21.3 ^{ab}	3 683 ^{bc}	9.4 ^{ab}
Multicepsa-Ab	97 ^b	88 ^c	8.9 ^c	19.4 ^c	3 398 ^c	9 ^b
Testigo	102 ^b	85 ^c	8.8 ^c	20.2 ^{bc}	3 510 ^{bc}	8.5 ^b
Significancia F	*	**	*	*	*	*
Coefficiente de variación (%)	7.7	22.1	17.3	5.4	15.7	4.8

un efecto sinérgico (Tabla 1).

Ensayo de 2003

La precipitación acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 81 mm. Los tratamientos influyeron significativamente en las características de la planta, en el rendimiento y en la proteína de grano de sorgo (Tabla 2). Para la altura de planta, solamente el hongo micorrízico arbuscular *G. intraradices* la incrementó significativamente (ANDEVA; $p = 0.05$) 8 cm sobre el testigo. El mayor peso de biomasa seca foliar (ANDEVA; $p = 0.01$), radical ($p = 0.05$), y mayor longitud de la panoja ($p = 0.05$) fue registrado con *G. intraradices*, el cual fue seguido y con promedios similares, por *A. brasilense* y la combinación de los dos microsimbiontes (Gi + Ab). Los mayores rendimientos de grano (ANDEVA; $p = 0.05$) se estimaron con la inoculación independiente de *G. intraradices* ó *A. brasilense*, los cuales promediaron 4089 y 3981 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2). El contenido de proteína en el grano fue incrementado significativamente ($p = 0.05$) por el hongo micorrízico arbuscular con relación al testigo. El aumento fue de 17%. Por el contrario, la multicepsa de *A. brasilense* no mostró una aportación significativa en las características de planta y de grano de sorgo (Tabla 2).

Ensayos 2002-2003

El análisis combinado de los ensayos de los dos años, indicó que los tratamientos con los endófitos influyeron en la altura de planta (ANDEVA;

$p = 0.05$) y en el rendimiento de grano de sorgo (ANDEVA; $p = 0.01$) (Tabla 3). La mayor altura de planta fue registrada con el tratamiento que llevó el hongo micorrízico arbuscular, ese incremento representó 6.5 cm con relación al testigo. La altura de planta con *A. brasilense* y la acción combinada de los dos microsimbiontes (Gi + Ab) fue significativamente semejante y superiores al testigo. En cuanto a la producción de grano, la inoculación con *G. intraradices* y *A. brasilense* obtuvieron los mayores rendimientos (Tabla 3).

Cuando se compararon los dos años (ambientes) se observó que en las condiciones de suelo de textura arcillosa en el ensayo de 2003, se obtuvieron diferencias significativas en altura de planta (ANDEVA; $p = 0.05$) y rendimiento de grano de sorgo (ANDEVA; $p = 0.01$) (Tabla 3).

DISCUSIÓN

En las condiciones de secano y semiáridas, donde se desarrolló el presente estudio, se demostró la efectividad de la inoculación a la semilla de sorgo con el hongo micorrízico arbuscular *G. intraradices* ó la rizobacteria promotora del crecimiento *A. brasilense*. En el ensayo de 2003, particularmente la multicepsa de *A. brasilense* no impactó la promoción del crecimiento y producción de sorgo, lo que puede ser reflejo del empleo de las cepas BV-112 y BV-191, las cuales de manera individual han tenido un efecto negativo en el rendimiento con respecto al testigo (Mendoza-Herrera *et al.* 2008).

Tabla 3. Influencia de la inoculación de microsimbiontes en el sorgo 'DK-52' Ensayos 2002 y 2003. Promedios unidos con la misma letra son semejantes (Tukey; $p=0.05$); *, ** = significancia en el ámbito de $p = 0.05$ ó 0.01 , respectivamente.

Table 3. Influence of microsymbionts inoculation on sorghum 'DK-52' Trials 2002 and 2003. Means followed by the same letter do not differ (Tukey; $p = 0.05$). *, ** = significant at level of $p = 0.05$ or 0.01 , respectively.

Factor	Altura de planta (g)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Tratamientos		
<i>G. intraradices</i> (Gi)	107.5 ^a	3 482 ^a
<i>A. brasilense</i> (Ab)	102 ^b	3 387 ^a
Gi + Ab	102.5 ^b	3 154 ^a
Testigo	101 ^c	2 850 ^b
Significancia F	*	**
Ensayo		
2002	102 ^b	2 623 ^b
2003	104.5 ^a	3 815 ^a
Significancia F	*	**
Coefficiente de variación (%)	7.1	14

El mayor rendimiento de grano se obtuvo con *G. intraradices* ó *A. brasilense*. Ambos resultados fueron consistentes en los dos ensayos. Otros estudios en campo también indicaron una respuesta positiva en la productividad de diversos cultivos con el hongo micorrízico arbuscular ó *A. brasilense* (Arsac et al. 1990; Arihara & Karasawa 1999; Dobbelaere et al. 2001; Irizar et al. 2003; Al-Karaki et al. 2004; Díaz-Moreno et al. 2007). Resultados obtenidos en maíz (*Zea mays* L.) (Díaz-Franco et al. 2005) mencionaron que *G. intraradices* ó *A. brasilense* inoculados en semilla de forma individual, incrementaron significativamente la producción de elote y de grano, e inclusive igualaron o superaron al tratamiento testigo con fertilización química. Así mismo, Mendoza-Herrera et al. (2008) reportaron mayor incremento en el rendimiento de sorgo con la inoculación independiente de los mismos microsimbiontes, comparada con la inoculación dual.

Por el contrario, diferentes investigaciones señalaron mejor respuesta de los cultivos o sinergia con la simbiosis doble del hongo micorrízico arbuscular - *A. brasilense* (Bashan et al. 1996; Aguirre-Medina 2008; Olalde-Portugal & Serratos 2008). Irizar et al. (2003) concluyeron que la efectividad de la inoculación dual *G. intraradices* - *A. brasilense* puede tener variabilidad según el cultivo, el genotipo o la condición agroclimática en la región central de México. En el presente estudio de secano, el efecto de ambos

microorganismos en las características de planta y de grano de sorgo, se ha relacionado a la dependencia de la planta hacia los microsimbiontes para la obtención de nutrimentos y agua (Al-Karaki & Clark 1998; Loredó-Ostí et al. 2004), la mayor exploración del suelo por el incremento de la longitud y profundidad de raíz (Sarig et al. 1992; González-Chávez et al. 2004) y la contribución de las hifas externas desarrolladas por el hongo micorrízico arbuscular. Estas hifas penetran en pequeños poros del suelo, donde los pelos radicales no tienen acceso (Davies et al. 1992; González-Chávez et al. 2004).

También, en cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) se han registrado casos no exitosos con *G. intraradices* y *A. brasilense* solos o en combinación (Díaz-Franco et al. 2006). En canola (*Brassica napus* L.) no ha habido efecto con la inoculación de *A. brasilense* (Díaz-Franco & Ortegón-Morales 2006). En ambas especies los microorganismos no influyeron en el crecimiento y rendimiento, excepto en riego restringido donde el hongo micorrízico arbuscular aportó en cártamo. Este fenómeno probablemente obedezca, entre otros factores, a que la actividad simbiótica puede ser afectada por las bajas temperaturas del suelo durante el invierno donde son cultivados (Díaz-Franco et al. 2006; Díaz-Franco & Ortegón-Morales 2006).

En el ensayo de 2003, resultó evidente el incremento en el contenido de proteína de grano de

sorgo promovido por *G. intraradices*. En contraste, Díaz-Moreno *et al.* (2007) reportaron similitud en el contenido de proteína de grano de sorgo, con o sin la inoculación del hongo micorrízico arbuscular. La calidad de rendimiento en los cultivos es un aspecto relevante por el valor agregado que representa.

La mayor altura de la planta y de rendimiento de grano de sorgo se registró con suelo de textura arcillosa en el ensayo de 2003. La variación en la respuesta comparada con el ensayo de 2002, puede ser atribuida a múltiples factores agroclimáticos, aunque la textura del suelo es determinante para las condiciones de secano y escasa precipitación. Durán-Arce (1992) señaló que en los suelos de textura arcillosa se conserva mejor la humedad residual y aquella proveniente de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo.

Los resultados de campo obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad del manejo con la inoculación de simbiontes, en particular con la acción independiente de *G. intraradices* ó *A. brasilense*. Esa práctica representa un componente biotecnológico que incrementa la productividad del sorgo en condiciones semiáridas y de secano.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la Fundación Produce Tamaulipas, A. C. y del Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal, del norte de Tamaulipas. A Juan Olvera Martínez y Francisco García Martínez† por su asistencia en los trabajos de campo.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Medina F (2008) Biofertilizantes microbianos: Antecedentes del programa y resultados de validación en México. En: Díaz-Franco A, Mayek-Pérez N (eds) La Biofertilización como Tecnología Sostenible. Plaza y Valdés-CONACYT. Distrito Federal. 257 pp.
- Alarcón A, Ferrera-Cerrato R (2000) Biofertilizantes: Importancia y utilización en la agricultura. Agr. Téc. Méx. 26: 191-203.
- Al-Karaki G, Clark RB (1998) Growth, mineral acquisition, and water use by mycorrhizal wheat grown under water stress. J. Plant Nutr. 21: 263-276.
- Al-Karaki G, McMichael B, Zak J (2004) Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. Mycorrhiza 14: 263-269.
- Anonymous (1997) Statgraphics Plus. Version 3.1. Manugistics Inc. Rockville. 374 pp.
- Anonymous (2008) Natural Resources Conservation Service. USDA. <http://plants.usda.gov/java/profile>
- Arihara J, Karasawa T (1999) Effect of previous crop on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. Soil Sci. Plant Nutr. 46: 43-51.
- Arsac JF, Lamothe C, Mulard D, Fages J (1990) Growth enhancement of maize (*Zea mays* L.) through *Azospirillum* inoculations. Agronomie 10: 640-654.
- Bashan Y, Holguín G, Ferrera-Cerrato R (1996) Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos. I. *Azospirillum*. Terra 14: 159-194.
- Davies FT, Potter JR, Linderman RG (1992) Mycorrhiza and repeated drought exposure affect drought resistance and extraradical hyphae development on pepper plants independent of plant size and nutrient content. J. Plant Physiol. 139: 289-294.
- Díaz-Franco A, Ortigón-Morales A (2006) Efecto de inoculación con *Azospirillum brasilense* y fertilización química en el crecimiento y rendimiento de canola (*Brassica napus*). Rev. Fitotec. Mex. 29: 63-67.

- Díaz-Franco A, Ortegón-Morales A, Garza-Cano I (2006) Biofertilización del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en condiciones limitadas de humedad en el suelo. Rev. Fitotec. Mex. 29: 175-180.
- Díaz-Franco A, Alvarado-Carrillo M, Cantú-Almaguer M, Garza-Cano I (2005) Fertilización biológica y producción de maíz en la región semiárida del norte de Tamaulipas, México. Agr. Téc. Méx. 31: 153-163.
- Díaz-Moreno R, Díaz-Franco A, Garza-Cano I, Ramírez-de-León A (2007) Brassinoesteroides e inoculación con micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*) en el crecimiento y la producción de sorgo en campo. Terra Latinoamer. 25: 77-83.
- Dobbelaere S, Anja C, Amber T, David P, Y Okon, J. Vanderleyden (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. Fert. Soils 36:284-297.
- Dobbelaere S, Croonenborghs A, Thys A, Ptacek D, Labandera G, Caballero M, Aguirre J, Burdman S, Sang S, Okon J (2001) Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. Austr. J. Plant Physiol. 28: 871-879.
- Durán-Arce M (1992) Suelos. En: Hess-Martínez L, Pérez-Díaz D (eds) Manual de Cultivos del Norte de Tamaulipas. SARH y Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal. Matamoros. 212 pp.
- Durán-Prado A, Aguirre-Medina J, González-Cu G, Peña-del-Río M, Schonhoven EV (2001) Producción in vivo de micorriza arbuscular *Glomus intraradices* con *Brachiaria bryzantha* como hospedero en camas reproductoras. Campo Experimental Cotaxtla, INIFAP. Folleto Técnico 29. Cotaxtla. 28 pp.
- Garza-Cano I, Pecina-Quintero V, Díaz-Franco A, Williams-Alanís H, Ramírez-de-León A (2005) Sorgo cultivado con biofertilizantes, fitohormonas y fósforo inorgánico. Terra Latinoamer. 23: 581-586.
- González-Chávez M, Gutiérrez-Castorena M, Wright S (2004) Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. Terra Latinoamer. 22: 507-514.
- Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, Turnau K, Baera J (2003) The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. Biol. Fert. Soils 37: 1-16.
- Irizar GM, Vargas P, Garza D, Tut C, Rojas M, Trujillo A, García R, Aguirre M, Martínez J, Alvarado S, Grageda O, Valero J, Aguirre J (2003) Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México. Agr. Téc. Méx. 29: 213-225.
- Kaya C, Higgs D, Kirmak H, Tas I (2003) Micorrhizal colonization improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus*) grown under well-watered and water-stressed conditions. Plant Soil. 253: 287-292.
- Loredo-Osti C, López-Redes L, Espinosa-Victoria D (2004) Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: Una revisión. Terra Latinoamer. 22: 225-239.
- Martínez MLJ, Soto UL, Baca BE, Sánchez AJ (2003) Indole-3-butyric acid (IBA) production in culture medium by wild strain *Azospirillum brasilense*. FEMS Microbiol. Letters 228: 167-173.
- Mendoza-Herrera A, Cruz-Hernández A, Jacques-Hernández C (2008) Aislamiento, selección y evaluación de un inoculante basado en cepas nativas de *Azospirillum* en el norte de Tamaulipas. En: Díaz-Franco A, Mayek-Pérez N (eds) La Biofertilización como Tecnología Sostenible. Plaza y Valdés-CONACYT. Distrito Federal. 257 pp.
- Olalde-Portugal V, Serratos R (2008) Biofertilizantes: Micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento. En: Díaz-Franco A, Mayek-Pérez N (eds) La Biofertilización como Tecnología Sostenible. Plaza y Valdés - CONACYT. Distrito Federal. 257 pp.

- Rosales-Robles E, Montes-García N, García-Gracia M, Reyes-Méndez C (2005) Tecnología para la producción de sorgo en el norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Memoria Técnica No. 1. Río Bravo. 38 pp.
- Salinas-García J (2002) Labranza para la conservación de suelo y agua en el norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Publicación Especial No. 25. Río Bravo. 20 pp.
- Salinas-García J, Alvarado-Carrillo M, Sánchez de la Cruz R (2006) Suelo y agua. En: Rodríguez del Bosque L (ed). Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas. Libro Técnico No. 1 Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Río Bravo. 287 pp.
- Sarig S, Okon Y, Blum A (1992) Effect of *Azospirillum brasilense* inoculation on growth dynamics and hydraulic conductivity of *Sorghum bicolor* roots. J. Plant Nutr. 15: 805-819.
- Williams-Alanís H, Montes-García N, Pecina-Quintero V (2006) Sorgo. En: Rodríguez del Bosque L (ed) Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas. Libro Técnico No. 1 Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Río Bravo. 287 pp.

