

RESPUESTA DEL SORGO A MICORRIZA ARBUSCULAR Y *Azospirillum* EN ESTRÉS HÍDRICO

RESPONSE OF SORGHUM TO ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND *Azospirillum* UNDER DROUGHT STRESS

Arturo Díaz Franco*, Idalia Garza Cano, Víctor Pecina Quintero
y Noé Montes García¹

¹Campo Experimental Río Bravo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carr. Matamoros-Reynosa, Km 61. Apdo. Postal 172. 88900, Río Bravo, Tam., México.

*Autor para correspondencia (diaz.arturo@inifap.gob.mx)

RESUMEN

Los microorganismos benéficos pueden coadyuvar en la tolerancia de las plantas a condiciones de sequía. Este estudio se hizo en campo para determinar el efecto de la inoculación del hongo micorrízico arbuscular (HMA) *Glomus intraradices* y de la rizobacteria promotora de crecimiento *Azospirillum brasilense*, sobre el crecimiento y rendimiento de grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) sujeto a un manejo con limitaciones de humedad en el suelo (riego restringido y seco). En 2002, semilla de sorgo inoculada con *G. intraradices* y *A. brasilense* se sembró y comparó con la fertilización química (120N-40P-00K), y en 2003 se evaluó el HMA y la fertilización nitrogenada reducida (80N-00P-00K). En ambos experimentos se midió altura de planta y rendimiento de grano; adicionalmente, en 2002 se cuantificó la colonización micorrízica y en 2003 el contenido de proteína en el grano. En 2002, la colonización micorrízica fue mayor en las plantas inoculadas con los simbiontes. El mayor rendimiento de grano se obtuvo con la inoculación, independiente de los simbiontes. En 2003, los tratamientos no tuvieron impacto en la altura de planta, pero que el HMA mejoró ($P \leq 0.01$) el rendimiento. El contenido de proteína en grano se incrementó ($P \leq 0.01$) con el HMA y la fertilización nitrogenada. *G. intraradices* incrementó ($P \leq 0.01$) el rendimiento de grano en los dos años. La condición de riego restringido elevó la altura de planta y el rendimiento de grano en ambos años y el contenido de proteína en 2003, pero no la colonización micorrízica en 2002, en relación con el ambiente de seco. Los resultados demostraron que la inoculación de los simbiontes puede incrementar la productividad del sorgo en condiciones limitadas de humedad en el suelo.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, *Glomus intraradices*, *Azospirillum brasilense*, crecimiento, rendimiento.

SUMMARY

Beneficial microorganism can help plants to tolerate drought conditions. This work was performed under field conditions to study the effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) *Glomus intraradices* and plant growth-promoting rhizobacteria *Azospirillum brasilense*, on the growth and grain yield of sorghum

(*Sorghum bicolor* L. Moench) under limited soil water conditions (restricted irrigation and rainfed). In 2002 sorghum seeds were inoculated with *G. intraradices* and *A. brasilense*, planted and compared with chemical fertilization (120N-40P-00K); in 2003, AMF and nitrogen reduced fertilization (80N-00P-00K) were evaluated. In both experiments plant height and grain yield were measured. During 2002 mycorrhizal colonization was quantified, and in 2003 grain protein content was measured. In 2002, mycorrhizal colonization was higher in plants inoculated with both microorganisms. Greater grain yield was obtained when symbionts were inoculated separately. In 2003 treatments did not show any impact on plant height, and only AMF was superior ($P \leq 0.01$) in grain yield. Grain protein content was increased ($P \leq 0.01$) with AMF and nitrogen fertilization. *G. intraradices* increased ($P \leq 0.01$) grain yield in both years. Restricted irrigation management promoted plant height and grain yield in both years and protein grain content in 2003, with respect to rainfed conditions, but had no effect on mycorrhizal colonization in 2002. Results demonstrated that inoculation with these symbionts might increase sorghum productivity in limited moisture soil conditions.

Index words: *Sorghum bicolor*, *Glomus intraradices*, *Azospirillum brasilense*, growth, grain yield.

INTRODUCCIÓN

La sequía limita la productividad agrícola en muchas de las regiones áridas y semiáridas del mundo. En la región semiárida del norte de Tamaulipas, los periodos prolongados de sequía han originado una escasez en la captación de agua para riego y por consecuencia severas limitaciones en las áreas agrícolas irrigadas (Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007). La implementación de tecnologías que faciliten a las plantas a soportar el estrés hídrico puede tener utilidad para mejorar la producción de los cultivos bajo esas condiciones.

La inoculación de las plantas con microorganismos simbioses mutualistas puede mejorar la producción de los cultivos en condiciones de sequía. Al respecto, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las rizobacterias promotoras del crecimiento (RPC) del género *Azospirillum*, son de los microorganismos benéficos más estudiados (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2000; Loredó *et al.*, 2004). La colonización micorrízica radical por HMA ha demostrado incrementos de productividad de numerosos cultivos en suelos con estrés hídrico (Al-Karaki y Clark, 1998; Al-Karaki *et al.*, 2004; Kaya *et al.*, 2003; Sylvia *et al.*, 1993). La promoción en la productividad de plantas con HMA es atribuida al mejor aprovechamiento de los nutrientes inmóviles del suelo tales como fósforo, zinc y cobre. Aunque otros factores asociados con la colonización de HMA pueden influir en la resistencia a sequía, éstos incluyen cambios en la elasticidad de la hoja (Augé *et al.*, 1995), incrementos en los potenciales de agua y turgencia en la hoja, moderación de la apertura estomatal y la transpiración (Augé, 2004; Ibrahim *et al.*, 1990), incrementos en la longitud y profundidad del sistema radical, y el desarrollo de hifas externas (González *et al.*, 2004). La colonización por HMA ha mostrado incrementos de la resistencia a la sequía en sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] (Augé *et al.*, 1995; Díaz *et al.*, 2007; Ibrahim *et al.*, 1990; Sieverding, 1986).

La RPC *Azospirillum brasilense* Terrand, Krieg et Döbereiner, ha beneficiado la productividad de diversos cultivos en ambientes de secano (Díaz *et al.*, 2005; Dobbelaere *et al.*, 2001; Irizar *et al.*, 2003; Loredó *et al.*, 2004). Esta RPC tiene la capacidad de fijar N₂, producir fitohormonas, siderófos, solubilizar el fósforo y promover la síntesis de enzimas que a la vez regulan los niveles de fitohormonas (Loredó *et al.*, 2004). Particularmente en sorgo, *A. brasilense* fue capaz de incrementar el rendimiento de grano entre 5 a 23 %, en condiciones semiáridas (Mendoza *et al.*, 2004); este efecto puede ser atribuido a que esa RPC aumenta el número y la longitud de raíces adventicias y su conductividad hidráulica, en plantas de sorgo inoculadas y sometidas a estrés hídrico (Sarig *et al.*, 1992). El objetivo de este estudio fue evaluar en campo el efecto de HMA y RPC en el crecimiento y rendimiento de sorgo sujeto a un manejo con limitaciones de humedad en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microsimbioses utilizados

La cepa regional del HMA *Glomus intraradices* Schenck *et* Smith, fue propagada 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 *et al.*, 2001), y cuyo hospedero fue pasto Sudán (*Sorghum vulgare sudanensis* Hitch.). El sustrato triturado y molido obtenido en la producción del HMA contenía una mezcla de raíces (con 75 % de colonización micorrízica) y suelo con no menos de 400 esporas/g. También se utilizó la cepa local de la RPC *A. brasilense* (CBG-497), del Centro de Biotecnología Genómica del Instituto Politécnico Nacional, Reynosa, Tamaulipas, preparada en turba y con un inóculo no menor de 1 x 10⁶ UFC (Mendoza *et al.*, 2004).

Características del suelo

Dos experimentos de campo se condujeron en el Campo Experimental Río Bravo (CERIB), INIFAP (25° 57' LN, 98° 01' LO), durante 2002 y 2003. Muestras de suelo de cada sitio por año, se tomaron en presiembra dentro de los primeros 30 cm de profundidad, para analizar las características físicas y químicas (Cuadro 1). El pH del suelo se determinó en solución acuosa (1:2); la conductividad eléctrica con el porcentaje de saturación; la materia orgánica se midió con dicromato de potasio; el N inorgánico (NO₃-N) se determinó mediante la reducción del cadmio; el P se midió con el método de Olsen; y el K se cuantificó con el método de cobaltonitrito (SEMARNAT, 2002). En los dos años de estudio las siembras se establecieron con humedad residual y se registraron las precipitaciones durante el desarrollo del cultivo.

Tratamientos y prácticas culturales

Experimento en 2002. Se incluyeron 10 tratamientos con tres repeticiones, resultantes de la combinación de dos regímenes de humedad y cinco niveles de inoculación, fertilización química o testigo. La dimensión de la parcela experimental fue de cuatro surcos de 6 m x 0.8 m.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos en los dos sitios de Río Bravo, Tam.

Sitio	pH	MO (%)	CE ⁵ (mS cm ⁻¹)	N (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Textura
2002	8.1	1.7	0.9	14.3	10.3	560	Arcilloso
2003	7.9	0.7	1.2	10.0	9.3	408	Arcilloso

⁵CE = Conductividad eléctrica; MO = Materia orgánica.

Los regímenes de humedad fueron: a) Riego restringido, con la aplicación de un solo riego de auxilio con lámina de 10 cm, en el estado de floración; y b) En temporal o seco. Los cinco niveles del otro factor consistieron en: 1) Inoculación de semilla de sorgo con *G. intraradices* (G), a razón de 1 kg de sustrato en la semilla para una hectárea (7 kg), mezcla hecha con 60 mL de carboximetil celulosa como adherente y ≈ 500 mL de agua (Díaz *et al.*, 2007); 2) Inoculación de la semilla con la rizobacteria *A. brasilense* (A) a razón de 0.4 kg de turba en la misma cantidad de semilla (Mendoza *et al.*, 2004); 3) Inoculación combinada con G + A; 4) Fertilización química a dosis de 120 kg ha⁻¹ de N y 40 kg ha⁻¹ de P (Montes y Aguirre, 1992), cuyas fuentes fueron urea y superfosfato de calcio triple, respectivamente, compuestos que fueron incorporados lateralmente en el surco al momento de la siembra; y 5) Testigo absoluto.

Se utilizó la semilla del híbrido de sorgo para grano 'Pioneer 82G63', sembrado manualmente el 24 de enero de 2002. La densidad de población se ajustó a 20 plantas por metro lineal. Otras prácticas agronómicas se siguieron según las recomendaciones locales (Rosales *et al.*, 2005).

Experimento en 2003. En este estudio se consideraron seis tratamientos con tres repeticiones. El tamaño de la parcela experimental fue la misma utilizada en el año anterior. Los tratamientos que incluyeron la condición de humedad también fueron los mismos: a) En riego restringido; y b) En seco. En este año no fue posible disponer de la cepa de *A. brasilense*, por lo que los niveles del otro factor consistieron en: 1) Inoculación de semilla con *G. intraradices*, de la forma descrita anteriormente; 2) Fertilización química reducida, 80 kg ha⁻¹ de N, en función a que comercialmente es común sólo la adición de N; y 3) Testigo absoluto. Como fuente de N se usó urea, la cual se incorporó lateralmente en el surco al momento de la siembra.

Se utilizó la semilla de sorgo del mismo híbrido 'Pioneer 83G63', sembrado manualmente el 6 de febrero de 2003 y la densidad se ajustó a 20 plantas/m lineal. Para el control de maleza se realizaron deshierbes manuales y para otras prácticas agronómicas se siguieron las indicaciones locales (Rosales *et al.*, 2005).

Variables medidas

En ambos experimentos se midió altura de planta y rendimiento de grano; adicionalmente en 2002 se cuantificó la colonización micorrízica en el sistema radical y en 2003 el contenido de proteína en el grano.

En el estado de madurez fisiológica se midió la altura en 10 plantas tomadas al azar de los surcos centrales de cada parcela, variable que está correlacionada con la biomasa (Crauford y Peacock, 1993; Díaz *et al.*, 2007). En el mismo estado de desarrollo de la planta se estimó el porcentaje de colonización micorrízica, en cinco plantas tomadas aleatoriamente (Al-Karaki *et al.*, 2004) de los dos surcos adyacentes a los centrales, las cuales se sacaron con pala para extraer el volumen de suelo debajo de la planta. Las raíces se lavaron para eliminar el suelo, se cortaron en fragmentos de 1 a 1.5 cm, se mezclaron y se tomaron submuestras de 1 g. Para determinar el porcentaje de colonización micorrízica total en los segmentos de raíz, se siguió la técnica de clareo con KOH 10 % y tinción con azul tripano 0.03 %, con montaje en laminillas para la cuantificación de las estructuras fúngicas, según el método de Phillips y Hayman (1970).

El rendimiento de grano total (kg ha⁻¹) se estimó en panojas comprendidas en el segmento central de 5 m y dentro de los dos surcos centrales de cada parcela experimental. Las panojas se secaron bajo sol y se trillaron; el rendimiento de grano se ajustó a 14 % de humedad. De cada parcela se tomaron 20 g de semilla como submuestra para la determinación del porcentaje del contenido de proteína mediante el método de Kjeldahl.

Diseño experimental y análisis estadístico

Los experimentos fueron en arreglo de parcelas divididas en bloques al azar y tres repeticiones. Las condiciones de humedad (riego restringido o seco) representaron las parcelas grandes, mientras que la inoculación de los microsimbiontes a la semilla y la fertilización química, constituyeron las parcelas chicas. Los datos se analizaron estadísticamente y en la comparación entre medias se utilizó Tukey ($P \leq 0.05$). Con los tratamientos iguales (*G. intraradices* y testigo absoluto), se hizo un análisis combinado de los dos años, en las variables altura de planta y rendimiento de grano, a través del programa Statgraphics Plus (Manugistics, Inc., 1997).

RESULTADOS

Experimento 2002. La precipitación registrada durante el desarrollo del sorgo fue de 19 mm. No obstante las críticas condiciones de sequía, los tratamientos manifestaron impacto significativo ($P \leq 0.01$) en altura de planta, colonización micorrízica y rendimiento de grano. Solamente en la altura de planta se observó una interacción significativa ($P \leq 0.001$) entre los niveles de inoculación explorados y la condición de humedad en el suelo; las otras variables mostraron una respuesta independiente entre los dos factores (Cuadro 2).

Cuadro 2. Inoculación de microsimbiontes y fertilización química asociados a características de planta de sorgo híbrido ‘Pioneer 82G63’, en dos condiciones de humedad en el suelo. Río Bravo, Tam., 2002.

Factores	Altura de planta (cm)	Colonización micorrízica (%)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Tratamientos (T)			
<i>G. intraradices</i> (G)	106 a	40.1 a	3698 a
<i>A. brasilense</i> (A)	107 a	37.6 a	3725 a
G + A	106 a	38.8 a	2874 b
120N-40P-00K	92 c	24.7 b	2669 b
Testigo	101 b	26.1 b	2715 b
Significancia F	**	**	**
Condición de humedad (C)			
Riego restringido	108 a	36.6	3810 a
Secano	97 b	33.6	2462 b
Significancia F	***	ns	***
T x C	***	ns	ns

Valores con la misma letra es una columna son semejantes (Tukey, 0.05). ns, ** *** No significativo y significativo a nivel de es $P \leq 0.01$ y 0.001 .

El porcentaje de colonización micorrízica fue significativamente mayor en las parcelas inoculadas con los simbiontes, comparado con la micorrización natural de las que recibieron fertilización química y que el testigo absoluto (Cuadro 2). Destaca el hecho de que el tratamiento con *A. brasilense* promovió la colonización de cepas nativas. La colonización micorrízica registrada entre las dos condiciones de humedad en el suelo fue semejante (Cuadro 2).

En las parcelas inoculadas con *G. intraradices* o *A. brasilense* de forma independiente, se obtuvieron los mayores rendimientos de grano, en los dos regímenes de humedad del suelo. Por el contrario, la combinación de los dos simbiontes originó un efecto antagónico en el rendimiento al abatirlo al nivel del testigo. Con relación a la condición de humedad, la sequía en la condición de secano redujo el rendimiento de grano (1348 kg ha⁻¹) en todas las parcelas, con respecto al régimen de riego restringido (Cuadro 2).

La condición de la humedad en el suelo fue un factor determinante en el rendimiento, pues el estrés de humedad abatió significativamente el rendimiento de grano. La interrelación entre los niveles de inoculación y la condición de humedad para la variable altura de planta, indicó que las parcelas de mayor altura fueron donde se conjuntó la inoculación de los microorganismos benéficos con el riego de auxilio en floración. En la condición de secano (sequía) la altura de las plantas fue semejante, con excepción de las parcelas donde se adicionó el fertilizante químico en las que se registró la menor altura ($P \leq 0.05$) (Figura 1). La correlación entre altura de planta, colonización micorrízica y rendimiento de grano, demostró solamente una asociación positiva entre la altura de planta y el rendimiento de grano ($r = 0.79^*$).

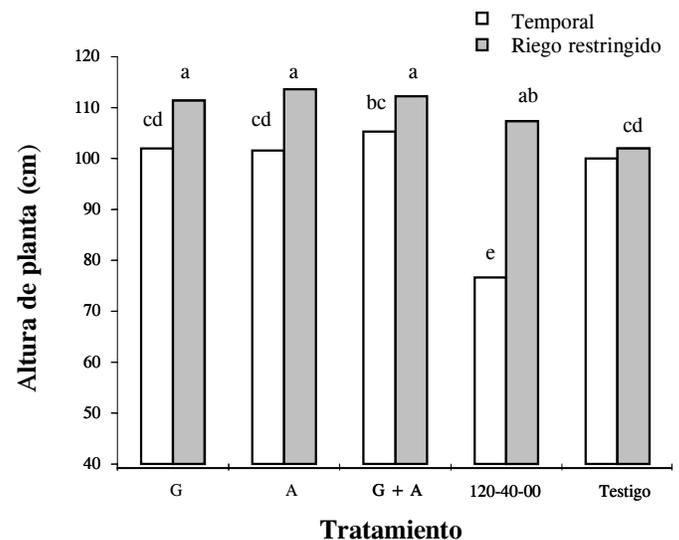


Figura 1. Altura de planta de sorgo híbrido ‘Pioneer 82G63’ influenciada por *Glomus intraradices* (G), *Azospirillum brasilense* (A) y fertilización química con 120N-40P-00K, en las dos condiciones de humedad en el suelo. Barras con la misma letra son estadísticamente semejantes (Tukey, 0.05).

Experimento 2003. En este año la lluvia acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 105 mm. En esas condiciones, también los niveles de inoculación mostraron un incremento significativo ($P \leq 0.01$) en las variables rendimiento y contenido de proteína en el grano de sorgo, mientras que para altura de planta no tuvieron un impacto significativo (Cuadro 3). No se detectaron interacciones significativas entre los niveles de inoculación evaluados y el manejo de la humedad en el suelo, lo que indica una respuesta independiente de los factores explorados.

En las parcelas inoculadas con el HMA se observó, al igual que en el experimento anterior, una importante promoción en el rendimiento de grano, significativamente superior ($P \leq 0.01$) al de la fertilización nitrogenada, la cual a la vez fue semejante con la producción obtenida en el testigo absoluto. Las parcelas sometidas a la condición de secano o temporal, mostraron en todos los casos los menores rendimientos de grano (Cuadro 3).

Se registró un incremento significativo en el contenido de proteína de grano tanto para el tratamiento que llevó la micorrización como para el que recibió la fertilización nitrogenada. Para la condición de humedad en el suelo, el riego de auxilio incrementó el porcentaje de proteína en el grano (Cuadro 3). Al igual que en el experimento anterior,

solamente se observó una asociación positiva entre altura de planta y rendimiento de grano ($r = 0.98^{**}$).

Experimentos 2002-2003. El análisis combinado indicó que el ensayo de 2003 hubo mayores valores de altura de planta ($P \leq 0.001$) y de rendimiento de grano de sorgo ($P \leq 0.01$). El HMA no modificó significativamente la altura, pero sí aumentó ($P \leq 0.01$) el rendimiento de grano. Para el factor condición de humedad, el manejo de riego restringido tuvo un efecto significativo ($P \leq 0.001$) al incrementar tanto la altura de planta como el rendimiento de grano (Cuadro 4). No se detectaron variaciones significativas en las interacciones de primero y segundo orden, lo que demuestra que los efectos de los factores en el estudio son independientes y que los años no afectaron las interacciones.

Cuadro 3. Micorrización y fertilización nitrogenada (N) asociados a características de planta de sorgo 'Pioneer 82G63', en dos condiciones de humedad en el suelo. Río Bravo, Tam., 2003.

Factores	Altura de planta (cm)	Grano	
		Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Proteína (%)
Tratamientos (T)			
<i>G. intraradices</i>	124	4615 a	8.7 a
N, 80 kg ha ⁻¹	121	3880 b	9.3 a
Testigo	120	3795 b	7.2 b
Significancia F	ns	**	**
Condición de humedad (C)			
Riego restringido	129 a	4966 a	9.4 a
Secano	115 b	3227 b	7.3 b
Significancia F	**	**	**
T x C	ns	ns	ns

Valores con la misma letra en una columna son semejantes (Tukey, 0.05). ns, ** No significativo y significativo a nivel es de $P \leq 0.01$.

Cuadro 4. Influencia de la micorrización del sorgo 'Pioneer 82G63' en la altura de planta y rendimiento de grano, bajo dos regímenes hídricos en 2002 y 2003. Río Bravo, Tam.

Factor	Altura de planta (cm)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Años		
2002	106 b	3698 b
2003	124 a	4615 a
Significancia F	***	**
Tratamientos		
<i>G. intraradices</i>	115	4156 a
Testigo	110	3255 b
Significancia F	Ns	**
Condición de humedad		
Riego restringido	118 a	4288 a
Secano	99 b	2944 b
Significancia F	***	***

Valores con la misma letra en una columna son semejantes (Tukey, 0.05). ns, ** *** No significativo y significativo a nivel de $P \leq 0.01$ y 0.001, respectivamente.

DISCUSIÓN

Las precipitaciones registradas en el 2002 (19 mm) son comunes, ya que como lo citaron Silva y Hess (2001), en la zona semiárida del norte de Tamaulipas la lluvia es un fenómeno climático con grandes variaciones y en los últimos años a decrecido considerablemente. Díaz *et al.* (2007) indicaron que este factor y otros han contribuido al decremento de la productividad agrícola de esa región.

Fue evidente el incremento de la colonización micorrízica en las plantas inoculadas con el HMA o con la rizobacteria promotora del crecimiento (RPC). Resultados similares se han registrado en sorgo, maíz (*Zea mays* L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) donde en unos casos hubo incrementos significativos de colonización micorrízica con la inoculación de *A. brasilense* o *G. intraradices* (Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007; Velasco *et al.*, 2001). En el presente estudio el nivel de la colonización micorrízica se mantuvo semejante en condiciones de sequía y con un riego de auxilio. Al-Karaki *et al.* (2004) informaron que plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivadas con suficiente humedad, mostraron mayor colonización micorrízica comparadas con las que tuvieron estrés hídrico. Tal como lo observado aquí, es importante hacer notar que diferentes investigadores (Allen *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007) han indicado que la colonización micorrízica en los cultivos no necesariamente se encuentra correlacionada con el rendimiento o sus componentes.

Se observó un incremento en la producción de grano de sorgo con la acción independiente de los microsimbiontes en 2002 y con el HMA en 2003; así mismo, el HMA mostró consistencia en el promedio de ambos años. Estos resultados coinciden con los reportados por Díaz *et al.* (2005) y Mendoza *et al.* (2004), quienes en el norte de Tamaulipas registraron la mayor producción con la inoculación independiente de los mismos microsimbiontes, comparada con la combinación de ambos. En otros estudios se ha informado de efectos aditivos o sinergias a través de la inoculación combinada de HMA y RPC (Irizar *et al.*, 2003; Olalde y Serratos, 2004). El impacto benéfico que tuvieron los microorganismos en el rendimiento de sorgo, bajo las condiciones limitadas de humedad en el suelo, puede ser atribuido a la dependencia de la planta hacia los simbioses para la adsorción de nutrientes y agua (Al-Karaki y Clark, 1998; Loredó *et al.*, 2004), así como a una mayor exploración del suelo debido al incremento de la longitud y profundidad del sistema radical (González *et al.*, 2004; Sarig *et al.*, 1992), y por las hifas externas desarrolladas en particular por los HMA, las cuales pueden penetrar en pequeños poros en el suelo donde los pelos radiculares no tienen acceso (González *et al.*, 2004).

En contraste, la inoculación con estas cepas (*G. intraradices* y *A. brasilense*) en cultivos de invierno como cártamo (*Carthamus tinctorious* L.) y canola (*Brassica napus* L.), los microorganismos no tuvieron influencia en el crecimiento y rendimiento, excepto en riego restringido donde el HMA mostró promoción en cártamo (Díaz *et al.*, 2006; Díaz y Ortegón, 2006). La diferente respuesta comparada con los resultados aquí obtenidos, podría atribuirse a las bajas temperaturas del suelo presentes durante el invierno. En relación con la colonización micorrízica, Hetrick *et al.* (1984) reportaron que en suelo a 10 °C no hubo micorrización en trigo, mientras que a 25 °C ésta fue de 8 %.

La fertilización química recomendada (2002) y reducida (2003), no impactaron en el rendimiento de grano de sorgo. Probablemente la ausencia de respuesta sea por la limitada humedad en la que se desarrolló el cultivo. Algunos estudios han demostrado la importancia que tiene el nivel de humedad del suelo en la eficacia de la fertilización inorgánica (Gutiérrez y Luna, 2002; Palomo *et al.*, 2004). El decremento significativo en la altura de planta de sorgo con la adición del fertilizante en temporal (sequía) en 2002, puede estar asociado a la característica higroscópica del fertilizante, lo que al parecer haría más crítico el estrés hídrico en el suelo, con un consecuente pobre crecimiento de la planta. Gutiérrez y Luna (2002) combinaron el número de riegos y la fertilización nitrogenada en maíz, y concluyeron que los menores rendimientos se obtuvieron con la menor humedad aprovechable (40 %) y altas dosis de N (160-200 kg ha⁻¹). Es entonces menester determinar el manejo óptimo de la fertilización química del sorgo para condiciones limitadas de humedad en el suelo. Díaz *et al.* (2007) señalaron que no obstante las necesidades nutrimentales de los cultivos en muchas regiones, la fertilización química es una práctica poco frecuente en las siembras comerciales. En Tamaulipas, por ejemplo, los productores que la practican por lo general aplican dosis reducidas de N, lo cual obedece a los altos costos de la fertilización y a la baja rentabilidad en la producción. Los mismos autores determinaron la rentabilidad del sorgo para grano con la inoculación de *G. intraradices* y la fertilización inorgánica (44N-37P-00K), donde obtuvieron una utilidad neta de \$ 783.20 ha⁻¹ y -\$ 465.50 ha⁻¹, respectivamente.

Además del aumento en la producción de sorgo, *G. intraradices* también promovió la calidad de la producción. En 2003 el HMA incrementó el porcentaje de proteína en el grano, similar a la obtenida con la adición de 80 kg ha⁻¹ de N. Existe limitada información sobre la influencia de los microorganismos benéficos sobre la calidad en rendimiento de los cultivos. En otros estudios con sorgo (Díaz *et al.*, 2007), se observó que la fertilización química o la inoculación con HMA no influyeron en el contenido de proteína de grano.

Numerosos factores pueden tener influencia en la efectividad simbiótica de los microorganismos en las plantas, como la cepa utilizada, la planta hospedera y las condiciones edáficas. Esto es importante de entender al manipular tales factores, para así optimizar el crecimiento de la planta en función a la actividad de los simbiontes empleados (Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2004).

La promoción del crecimiento, el rendimiento y el contenido de proteína de grano reportado aquí, demuestra el potencial que tiene la inoculación de los simbiontes para reducir los efectos del déficit hídrico en sorgo cultivado en condiciones semiáridas.

CONCLUSIONES

En 2002, la colonización micorrízica fue promovida con la inoculación de *G. intraradices* o de *A. brasilense*, mientras que la condición de humedad no tuvo influencia en dicha colonización. El mayor rendimiento de grano se obtuvo con la actividad independiente de los dos simbiontes, así como la condición de riego restringido. La mayor altura de planta se registró con la inoculación de los microorganismos bajo el manejo de riego restringido; por el contrario la menor altura fue con la adición de 120N-40P-00K en secano o temporal (sin riego).

En 2003, solamente el riego restringido incrementó la altura de planta; el rendimiento de grano fue mayor con *G. intraradices*, y la proteína en grano aumentó con el HMA y con 80N-00P-00K. Tanto el rendimiento como la proteína de grano se incrementaron con el riego restringido, en comparación con la condición de secano.

En ambos años e independientemente de la condición hídrica, los mayores rendimientos de grano se registraron con la inoculación de *G. intraradices*. Entre condiciones de humedad, el riego restringido superó significativamente a la de secano en el rendimiento.

AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo financiero de la Fundación Produce Tamaulipas, A. C. y del Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal, del norte de Tamaulipas, a través del proyecto 3113315A. Al Dr. Alberto Mendoza Herrera del Centro de Biotecnología Genómica, IPN, por facilitar la cepa CBG-497 de *A. brasilense*. A Juan Olvera Martínez y Francisco García Martínez[†], por su colaboración en los trabajos de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón A, R Ferrera-Cerrato (2000)** Biofertilizantes: Importancia y utilización en la agricultura. *Agric. Téc. Méx.* 26:191-203.
- Allen B L, V D Jolley, C W Robbins, L L Freeborne (2001)** Fallow wheat cropping of unamended and manure-amended soil related to mycorrhizal colonization, yield and plant nutrition of dry bean and sweet corn. *J. Plant Nutr.* 24:921-943.
- Al-Karaki G, R B Clark (1998)** Growth, mineral acquisition, and water use by mycorrhizal wheat grown under water stress. *J. Plant Nutr.* 21:263-276.
- Al-Karaki G, B McMichael, J Zak (2004)** Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14:263-269.
- Augé R M (2004)** Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Can. J. Soil Sci.* 84:373-381.
- Augé R M, A J Stodola, R C Ebel, X Duan (1995)** Leaf elongation and water relations of mycorrhizal sorghum in response to partial soil drying: two *Glomus* species at varying phosphorous fertilization. *J. Exp. Bot.* 46:297-307.
- Crauford P Q, J M Peacock (1993)** Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. *Exp. Agric.* 29:77-86.
- Díaz F A, M Alvarado C, M Cantú A, I Garza C (2005)** Fertilización biológica y producción de maíz en la región semiárida del norte de Tamaulipas, México. *Agric. Téc. Méx.* 31:153-163.
- Díaz F A, A Ortegón M (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 F A, A Ortegón M, I Garza C (2006)** Biofertilización del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en condiciones limitadas de humedad en el suelo. *Rev. Fitotec. Mex.* 29:175-180.
- Díaz M R, A Díaz F, I Garza C, A Ramírez L (2007)** Brassinoesteroides e inoculación con *Glomus intraradices* en el crecimiento y la producción de sorgo en campo. *Terra Latinoam.* 25:77-83.
- Dobbelaere S, A Croonenborghs, A Thys, D Pfacek, G Labandera, M Caballero, J Aguirre, S Burdman, S Sang, J Okon (2001)** Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. *Austr. J. Plant Physiol.* 28:871-879.
- Durán P A, J Aguirre M, G González C, M Peña del R, E V Schonhoven (2001)** Producción *in vivo* de micorriza arbuscular *Glomus intraradices* con *Brachiaria bryzantha* como hospedero en camas reproductoras. *Campo Experimental Cotaxtla, INIFAP. Folleto Técnico No. 29. México.* 28 p.
- Ferrera-Cerrato R, A Alarcón (2004)** Biotecnología de los hongos micorrízicos arbusculares. *In: Memoria Simposio de Biofertilización.* A Díaz F, N Mayek P, A Mendoza H, N Maldonado M (eds). *Campo Experimental Río Bravo, INIFAP y Centro de Biotecnología Genómica, IPN. Río Bravo, Tam., México.* pp:1-9.
- González Ch M, M Gutiérrez C, S Wright (2004)** Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latinoam.* 22:507-514.
- Gutiérrez S J, M Luna F (2002)** Riego, densidad de plantas y fertilización nitrogenada en producción de maíz híbrido en Zacatecas. *Agric. Téc. Méx.* 28:95-103.
- Hetrick B A, W W Bockus, J Bloom (1984)** The role of VAM fungi in the growth of Kansas wheat. *Can. J. Bot.* 62:735-740.
- Ibrahim M A, W F Campbell, L A Rupp, E B Allen (1990)** Effects of mycorrhizae on sorghum growth, photosynthesis and stomatal conductance under drought conditions. *Arid Soil Res. Rehabil.* 4:99-107.
- 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, J Aguirre (2003)** Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México. *Agric. Téc. Méx.* 29:213-225.

- Kaya C, D Higgs, H Kirnak, I Tas (2003)** Mycorrhizal 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 O C, L López R, D Espinosa V (2004)** Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: Una revisión. *Terra Latinoam.* 22:225-239.
- Mendoza H A, A Cruz H, C Jacques H (2004)** Aislamiento, selección y evaluación de un inoculante basado en cepas nativas de *Azospirillum* en el norte de Tamaulipas. *In: Memorias Simposio de Biofertilización.* A Díaz F, N Mayek P, A Mendoza H, N Maldonado M (eds). Campo Experimental Río Bravo, INIFAP y Centro de Biotecnología Genómica, IPN. Río Bravo, Tam., México. pp:87-101.
- Manugistics, Inc (1997)** Statgraphics Plus. Version 3.1. Rockville, MD. USA.
- Montes G N, J Aguirre R (1992)** Producción de sorgo de temporal en el norte de Tamaulipas. pp. 54-63. *In: Manual de Cultivos del Norte de Tamaulipas.* L Hess M, D Pérez D (eds). SARH, INIFAP, Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal. Matamoros, Tam., México. pp:54-63.
- Olalde P V, R Serratos (2004)** Biofertilizantes: Micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento. *In: Memorias Simposio de Biofertilización.* A Díaz F, N Mayek P, A Mendoza H, N Maldonado M (eds). Campo Experimental Río Bravo, INIFAP y Centro de Biotecnología Genómica, IPN. Río Bravo, Tam., México. pp:31-35.
- Palomo G A, M Gaytán A, R Faz C, D Reta S, E Gutiérrez R (2004)** Rendimiento y calidad de fibra de algodón en respuesta al número de riegos y dosis de nitrógeno. *Terra Latinoam.* 22:299-305.
- Phillips J M, D S Hayman (1970)** Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55:158-161.
- Rosales R E, N Montes G, M García G, C Reyes M (2005)** Tecnología para la producción de sorgo en el norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Memoria Técnica No. 1. México. 74 p.
- Sarig S, Y Okon, A Blum (1992)** Effect of *Azospirillum brasilense* inoculation on growth dynamics and hydraulic conductivity of *Sorghum bicolor* roots. *J. Plant Nutr.* 15:805-819.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2002)** Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial. Martes 31 de diciembre. pp:1-75.
- Sieverding E (1986)** Influence of soil water regimes on VA mycorrhiza, IV. Effect on root growth and water relations of *Sorghum bicolor*. *J. Agron. Crop Sci.* 157:36-42.
- Silva S M, L Hess M (2001)** Caracterización del clima en el norte de Tamaulipas y su relación con la agricultura. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Folleto Técnico No. 1. México. 50 p.
- Sylvia D M, L C Hammond, J M Bennett, J H Hass, S B Linda (1993)** Field response of maize to a VAM fungus and water management. *Agron. J.* 85:193-198.
- Velasco V J, R Ferrera-Cerrato, J J Almaraz S (2001)** Vermicomposta, micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense* en tomate de cáscara. *Terra* 19:241-248.