

ANÁLISIS DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ EN CLIMA CÁLIDO EN FUNCIÓN DEL GENOTIPO, BIOFERTILIZANTE Y NITRÓGENO

Analysis of Maize Growth and Grain Yield in a Hot Climate in Function of Genotype, Biofertilizer and Nitrogen

Cid Aguilar Carpio^{1‡}, José Alberto Salvador Escalante Estrada¹ e Immer Aguilar Mariscal¹

RESUMEN

Para reducir el costo de producción en maíz y conservar el ambiente es necesario sustituir o complementar la fertilización química con biofertilizantes. Sin embargo, en maíz con biofertilizantes no se han encontrado efectos en crecimiento y rendimiento de grano. Por lo que, el objetivo del presente estudio fue determinar la producción de materia seca, tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo y rendimiento de grano de maíz mejorado y criollo en siembra temprana bajo riego, en función del nitrógeno y biofertilizante aplicado. El estudio se estableció en Iguala, Gro., el 23 de enero del 2011; bajo condiciones de riego se sembró el maíz criollo raza “Vandeño” y el híbrido H-562, los tratamientos consistieron en la inoculación a la semilla del biofertilizante y la aplicación de 0, 80 y 160 kg N ha⁻¹. Para evaluar el crecimiento del cultivo, se contabilizó el número de hojas y el área foliar. Con estos datos se calcularon las tasas medias de crecimiento del cultivo \overline{TCC} y asimilación neta \overline{TAN} . A la madurez fisiológica se evaluó la materia seca total (MS) y rendimiento de grano (RG). En Vandeño el uso de biofertilizante y 160 kg N ha⁻¹ incrementó la MS durante el desarrollo del cultivo, pero no fue significativo para el RG. En cuanto al índice y duración de área foliar, el más alto fue con 80 y 160 kg N ha⁻¹, lo que ocasionó la mayor \overline{TCC} , pero no así en la \overline{TAN} . En relación a H-562, la más alta producción de materia seca total y rendimiento de grano fue con 160 kg N ha⁻¹, asimismo se incrementó el índice y duración de área foliar, que generó la más alta tasa de crecimiento del cultivo y asimilación neta.

Palabras claves: materia seca, área foliar, grano.

SUMMARY

To reduce the cost of maize production and conserve the environment, it is necessary to replace or supplement chemical fertilizers with biofertilizers. However, in maize, biofertilizer effects on growth and grain yield have not been found. Thus, the objective of the study was to determine dry matter production, net assimilation rate, crop growth rate and grain yield of improved and native maize under irrigation and early sowing, in function of nitrogen and biofertilizer. The study was established in Iguala, Guerrero, on January 23, 2011. The native maize race “Vandeño” and the hybrid H-562 were sown. Treatments consisted of inoculation of seed with biofertilizer and application of 0, 80 and 160 kg N ha⁻¹. To evaluate crop growth, the number of leaves and leaf area were recorded. With these data, the average rates of crop growth (CGR) and net assimilation (RNA) were calculated. At physiological maturity, total dry matter (DM) and grain yield (GY) was evaluated. In Vandeño, the use of biofertilizer and 160 kg N ha⁻¹ increased DM during the growing season, but the GY increase was not significant. As for the rate and duration of leaf area, the highest was with 80 and 160 kg N ha⁻¹, which caused the highest CGR but not the highest NAR. Regarding H-562, the highest production of total dry matter and grain yield was achieved with 160 kg N ha⁻¹. This treatment also increased the rate and duration of leaf area, which generated the highest rate of crop growth and net assimilation.

Index words: dry matter, leaf area, grain.

INTRODUCCIÓN

El maíz es el cultivo más estudiado en México, por ser el alimento básico de los mexicanos. Se siembran alrededor de 7.4 millones de ha, con rendimiento promedio de 3.19 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2012). Los principales estados productores son: Sinaloa, Jalisco, Estado de México, Michoacán y Guerrero, este último presenta un

¹ Programa de Botánica. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (aguilar.cid@colpos.mx)

Recibido: mayo de 2014. Aceptado: febrero de 2015.

Publicado en Terra Latinoamericana 33: 51-62.

rendimiento promedio de 2.80 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2012). Sin embargo, los rendimientos de grano de maíz varían entre genotipos, lo cual dificulta la selección de cultivares con mayor adaptación a las condiciones ambientales de una misma localidad. Por ello, se debe explorar el tipo de variedades que conviene sembrar en cada agrosistema, y el manejo más apropiado para un mejor aprovechamiento de su potencial genético.

Los ambientes tropicales se caracterizan por presentar severas restricciones para el desarrollo agrícola, como la baja disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Roveda y Polo, 2007). Dentro de los fertilizantes utilizados en la agricultura, el más usado es el elaborado a base de nitrógeno, por ser determinante en el incremento del rendimiento de maíz, aunque, representa una inversión de alto costo y riesgo ambiental. Para reducir el costo de producción en maíz y conservar el ambiente es necesario sustituir o complementar la fertilización química con formas biológicas (Uribe y Dzib, 2006). Las bacterias y hongos son capaces de proveer a la planta diferentes nutrimentos en forma asimilable (Uribe y Dzib, 2006). Sin embargo, en maíz no se han encontrado efectos importantes derivados de la biofertilización en el crecimiento y rendimiento de grano (García *et al.*, 2007).

El crecimiento del cultivo está influenciado principalmente por el clima y los nutrimentos (Naresh y Singh, 2001). Con base en lo anterior, el análisis de crecimiento ha sido usado para el estudio de los factores (nitrógeno, biofertilizante y condiciones ambientales) que influyen en el desarrollo y rendimiento de las plantas, mediante el seguimiento de la acumulación de materia seca durante el ciclo del cultivo (Santos *et al.*, 2010); por otro lado, también para comparar el rendimiento de diferentes cultivares y especies en condiciones similares de crecimiento (Woo *et al.*, 2004). El análisis de crecimiento usa medidas directas como el peso de la materia seca, que depende del tamaño, actividad y duración del área foliar (Tekalign y Hammes, 2005). Con esto se pueden calcular variables, como: el índice de área foliar (IAF), que representa la relación entre el área foliar y el área de suelo ocupada por el cultivo; la tasa de asimilación neta (TAN), que indica la eficiencia fotosintética promedio, al medir la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar y tiempo; la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), considerado un índice de la productividad agrícola, mide la ganancia en peso de

un cultivo por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo. En cuanto al tiempo que el follaje persiste, se tiene la duración de área foliar (DAF) como índice que representa la producción de hojas en el periodo de crecimiento del cultivo (Santos *et al.*, 2010).

Estudios en maíz indican que con la inoculación de *Azospirillum* y *Glomus* se ha logrado incrementar la producción de materia seca (MS) y el rendimiento de grano, consecuencia de mayores tasas de crecimiento (Pecina *et al.*, 2005; García *et al.*, 2007; Roveda y Polo, 2007). Al respecto, Díaz-López *et al.* (2013) observaron diferencias en la TAN entre genotipos de maíz siendo el más alto a los 34 dds. Con la incorporación de nitrógeno en el suelo, el cultivo de maíz, puede incrementar la MS, IAF, DAF, TCC y TAN (Quiroz y Marín, 2000; Naresh y Singh, 2001; Woo *et al.*, 2004). En general, los antecedentes indican que la inoculación con *Azospirillum*, *Glomus* y el uso de nitrógeno, se incrementa la producción de materia seca y rendimiento de grano, como resultado de mayores índices de crecimiento, tanto en maíz criollo como híbrido. No obstante, los reportes sobre el tema en clima cálido y con los genotipos regionales del estado de Guerrero no son abundantes, por lo que el objetivo del presente estudio fue determinar la producción de materia seca, TAN, TCC y rendimiento de grano en maíz mejorado y criollo en siembra temprana bajo riego, en función de la aplicación de nitrógeno y biofertilizante.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se estableció en Iguala, Gro., durante el año 2011, de clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media de 26.4 °C. La precipitación anual es de 1100 mm y altitud de 635 m (Aw₀, García, 2005). El 23 de enero, bajo condiciones de riego, se sembró el maíz criollo raza "Vandeño" y el híbrido H-562; los tratamientos consistieron en la inoculación a la semilla con el biofertilizante, a razón de 1 kg de *Glomus* y 0.4 kg de *Azospirillum*, el cual se mezcló con agua y adherente en 20 kg de semilla de maíz. Además, se emplearon tres niveles de fertilización 0, 80, 160 kg N ha⁻¹, los cuales se aplicaron de forma fraccionada, la mitad de N a los 10 días después de la siembra (dds) y el resto a los 40 dds. La densidad de población fue de 6.25 pl m⁻² y con distancia entre surcos de 80 cm. El diseño experimental fue de bloques

completamente al azar, con arreglo en parcelas sub divididas con 4 repeticiones. La unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m de ancho \times 4 m de longitud. Durante el desarrollo del estudio se registró la temperatura máxima (T_{máx}), mínima (T_{mín}) decenal y la suma de la evaporación (Ev, mm) y precipitación (PP, mm), datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA). También se registró la ocurrencia de las fases fenológicas, como: días a emergencia (E), floración (FL) y a madurez fisiológica (MF). El criterio utilizado es presentado en Ritchie y Hanway (1982). Además, para cada fase fenológica se determinó la acumulación de unidades calor para el cultivo (UC, °C d), mediante el método residual, el cual es descrito por la siguiente ecuación, como se indica en Snyder (1985):

$$UC = (T_{máx} + T_{mín} / 2) - TB$$

donde: T_{máx} = temperatura máxima diaria (°C), T_{mín} = temperatura mínima diaria (°C) y TB = temperatura base, considerada de 10 °C (Villalpando y Ruiz, 1993). La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculó a partir de los datos de la evaporación (Ev) del tanque tipo "A", utilizando 0.6 como coeficiente para el evaporímetro, kc inicial = 0.35, kc a mediados del periodo = 1.14 y kc final = 0.6 (Doorenbos y Pruitt, 1986), a partir de la siguiente ecuación:

$$ET_c = Ev * 0.6 * Kc$$

Para evaluar el crecimiento del cultivo se hicieron muestreos destructivos de dos plantas en la parcela útil de cada unidad experimental a los 36, 54, 90 y 115 dds; en cada muestreo se contabilizó el número de hojas por m² (NH) y área foliar, que se midió con un integrador electrónico (LI-COR 3100). Se calculó el índice de área foliar (IAF) y la duración del área foliar total (DAFT) con base en la siguientes ecuaciones: $IAF = (AF / NP) * DP / 100 \text{ dm}^2$, donde AF = área foliar (dm²), NP = número de plantas muestreadas y DP = número de plantas m². $DAF = \Sigma (IAF_1 + IAF_2) (T_2 - T_1) / 2$, donde: Σ = sumatoria de la duración del área foliar para cada periodo estudiado, IAF₁ = índice de área foliar en un tiempo inicial (T₁, en días), IAF₂ = índice de área foliar en un tiempo final (T₂, en días) (Escalante y Kohashi, 1993). También se evaluó la materia seca (MS, g m⁻²),

para lo cual las muestras se secaron a 80 °C en una estufa de circulación de aire forzado hasta peso constante. Con estos datos se calcularon las tasas medias de: crecimiento del cultivo (\overline{TCC}) y asimilación neta (TAN), mediante las ecuaciones: $\overline{TCC} = [(PS_2 - PS_1) / A(T_2 - T_1)]$, donde: PS₂ y PS₁ indican el peso de la materia seca de la planta en los tiempo T₂ y T₁, respectivamente, y A representa el área ocupada por la planta. $TAN = [(PS_2 - PS_1) / (IAF_2 - IAF_1)] / [(\ln IAF_2 - \ln IAF_1) / (T_2 - T_1)]$, donde: PS₂ y PS₁ expresan el peso de MS de la planta, ln AF₂ y ln AF₁, logaritmo natural del índice de área foliar en el tiempo T₂ y T₁, respectivamente (Escalante y Kohashi, 1993). A la madurez fisiológica se evaluó la materia seca total (MS, g m⁻²) y el rendimiento de grano (RG, g m⁻²). A las variables en estudio se les aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) mediante el programa estadístico del SAS, Versión 9.0 (SAS, 2003), cuando existieron diferencias significativas, se realizó la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología, Condiciones Climáticas, Unidades Calor y Evapotranspiración

Se observa la media decenal de la temperatura máxima (T_{máx}, °C) y mínima (T_{mín}, °C) en la Figura 1, que durante el desarrollo del cultivo fluctuó entre 33 y 38 °C, y entre 20 y 25 °C, respectivamente. Desde siembra (S) hasta MF, la T_{máx} y T_{mín} promedio fueron de 20 a 38 °C, respectivamente. Por lo que éstas no fueron limitantes para una mayor expresión del rendimiento en los genotipos estudiados, debido a que la T_{máx} en la cual se afecta el desarrollo del maíz se encuentra entre 40 y 44 °C (Kiniry y Bonhomme, 1991). La suma decenal de la precipitación (PP, mm) durante el cultivo fue de 60 mm. Al respecto, Pedrol *et al.* (2008) establecen que los requerimientos hídricos del maíz durante su ciclo son alrededor de 550 a 575 mm, superior a lo reportado en el estudio. Con base en lo anterior, se recurrió a la aplicación de 8 riegos cada 15 días, con lámina de 111 mm por riego durante el cultivo. Respecto a la evapotranspiración del cultivo (ET_c), se observó la más alta (61 mm) en la tercera decena de marzo (Figura 2).

En los genotipos en estudio, la ocurrencia de las etapas fenológicas fueron de la siguiente forma:

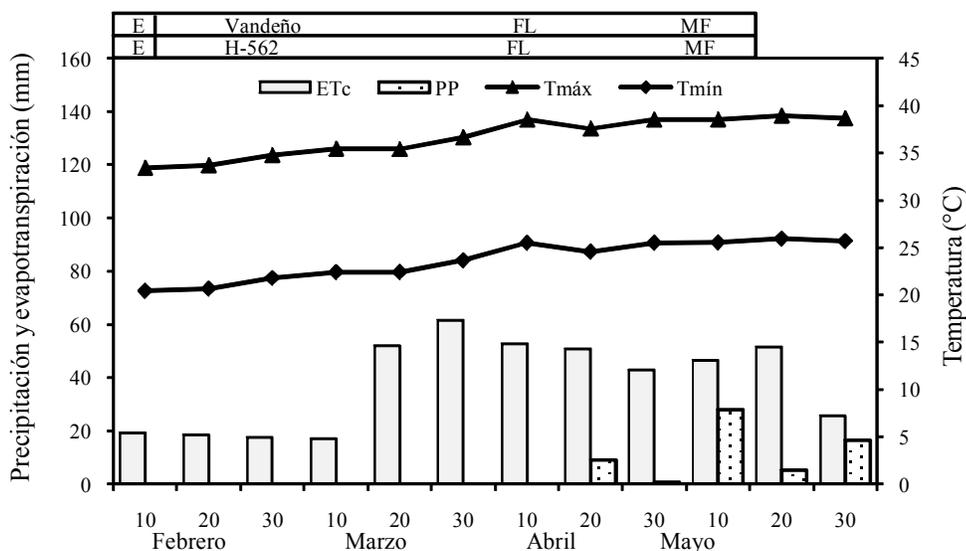


Figura 1. Medias decenales de la temperatura máxima (Tmáx, °C), mínima (Tmín, °C) y suma decenal de la precipitación (PP, mm) y evapotranspiración (ETc, mm) durante el ciclo del cultivo de los maíces Vandeño y H-562. E = emergencia, FL = floración, MF = madurez fisiológica. Iguala, Gro. 2011.

La emergencia ocurrió a los 5 dds en todos los tratamientos. Sin embargo, se observan diferencias genotípicas en la floración, al presentarse en el maíz “Vandeño” a los 74 dds y en H-562 a los 72 dds. La madurez fisiológica en ambos genotipos ocurrió a los 115 dds (Figura 1).

En la Figura 2 se observa que la acumulación de UC y la evapotranspiración (ETc) durante el ciclo del cultivo siguió una tendencia lineal que se ajustó al modelo $y = a + bx$. Así, para Vandeño y H-562 las UC fueron de 2110 °C d, de S a MF. En referencia, Núñez *et al.* (2005) reportan en maíces híbridos, cultivados en Matamoros,

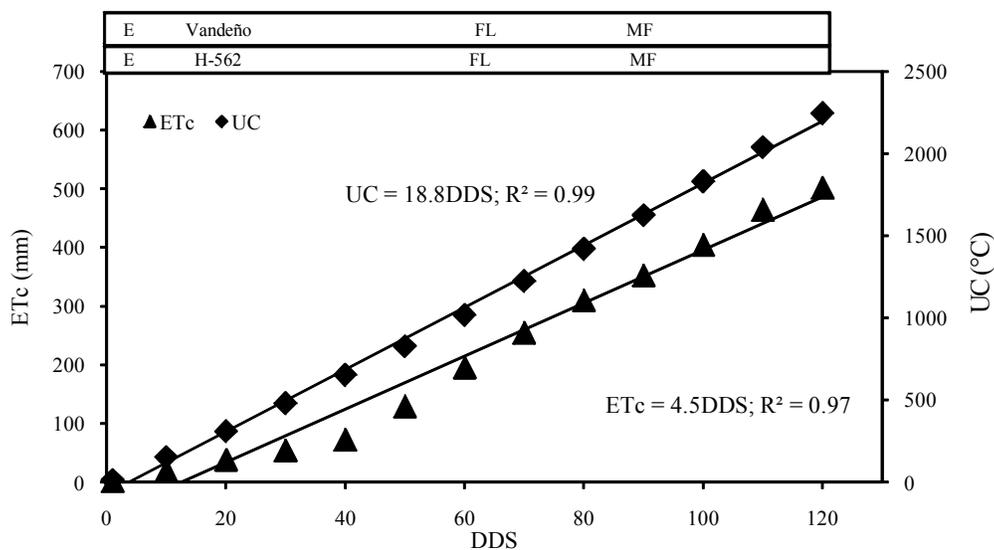


Figura 2. Unidades calor (UC), evapotranspiración (ETc) y fenología durante el ciclo del cultivo en los genotipos Vandeño y H-562. E = emergencia, FL = floración; MF = madurez fisiológica. Iguala, Gro. 2011.

Cuadro 1. Análisis de varianza para número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración de área foliar total (DAFT, días). Iguala, Gro. 2011.

Fuente de Variación	NH				IAF				DAFT
	36	54	90	115	36	54	90	115	Días
	----- Días después de la siembra -----								
G	**	*	*	*	**	**	**	**	**
Bio	**	**	**	**	**	*	NS	NS	*
G * Bio	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N	**	**	**	**	**	**	**	**	**
G * N	**	*	*	**	**	NS	NS	NS	*
Bio * N	*	*	*	*	*	*	*	*	*
G * Bio * N	*	**	**	**	*	*	*	*	*

*, ** = $P \leq 0.05$, 0.01 , respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$; G = genotipo, Bio = biofertilizante, N = nitrógeno.

Coahuila, que es un clima semicálido árido, 1470 °C d a MF, valores inferiores a los obtenidos en el presente estudio. Esto probablemente se debe a que las temperaturas diarias en Iguala fueron más altas que en Matamoros. En cuanto a la ETc acumulada de S a MF para ambos cultivares, fue de 485 mm. Lo anterior indica que las necesidades de agua del cultivo fueron similares para Vandeño y H-562.

Número de Hojas, Índice de Área Foliar y Duración del Área Foliar

El ANDEVA presentado en el Cuadro 1, para el NH, IAF y DAFT mostró cambios significativos debido

a genotipos (G), nitrógeno (N) y la interacción genotipo * biofertilizante (G*Bio), biofertilizante * nitrógeno (Bio*N) y Genotipo * biofertilizante * nitrógeno (G*Bio*N). En contraste, el IAF no fue afectado por los factores Bio y G*N a los 90 y 115 dds, respectivamente.

Genotipo

Se observan cambios significativos entre genotipos (Cuadro 2), que presenta el NH, IAF y DAFT. De los 54 a 115 dds el NH de Vandeño fue superior a H-562. La mayor área foliar en Vandeño es resultado de las características genéticas del genotipo, ya que produce

Cuadro 2. Número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar total (DAFT, días) en genotipos (G) de maíz en función del biofertilizante (Bio) y nitrógeno (N). Iguala, Gro. 2011.

Fuente de Variación		NH				IAF				DAFT
		36	54	90	115	36	54	90	115	Días
		----- Días después de la siembra -----								
Genotipo	Vandeño	48b	74a	74a	46a	1.0b	4.1b	4.4b	2.5b	308b
	H-562	55a	71b	71b	41b	1.5a	4.6a	4.9a	3.0a	354a
	Tukey $P \leq 0.05$	2.6	2.5	2.2	3.1	0.2	0.2	0.2	0.2	23
Bio	Sin	48b	71b	70b	41b	1.0b	4.3b	4.6a	2.7a	316b
	Con	56a	74a	74a	46a	1.5a	4.5a	4.8a	2.9a	345a
	Tukey $P \leq 0.05$	2	1	1.5	1	0.1	0.3	0.3	0.3	24
N (kg ha ⁻¹)	0	48b	71b	71b	40b	1.0b	3.9b	4.2b	2.3b	293b
	80	55a	71b	71b	41b	1.3a	4.6a	4.9a	3.0a	350a
	160	53a	75a	75a	49a	1.4a	4.6a	4.9a	3.0a	349a
	Tukey $P \leq 0.05$ (DMS)	2.3	2.4	2.3	2.3	0.1	0.4	0.4	0.4	33
	Media general	52	72	72	43	1.2	4.4	4.7	2.8	331
	CV (%)	5	3	3	6	16	12	11	18	11

En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

mayor número de hojas. Sin embargo, esto no se reflejó en el IAF y DAFT, debido a que en H-562 se presentó una mayor expansión y duración del área foliar. Al respecto, Ortiz *et al.* (2005) encontraron que el IAF del maíz fue de 6, superior a los genotipos del presente estudio, debido a que los materiales genéticos presentaron mayor área foliar total.

Biofertilizante

Desde los 36 hasta los 115 dds, el maíz con biofertilizante superó al testigo sin aplicación en el NH, IAF y DAFT (Cuadro 2). Asimismo, la aparición del NH por m² se incrementó con Bio en 4% y el IAF en 0.5 a los 54 dds. Dicho comportamiento puede deberse a que el Bio pudo haber estimulado el desarrollo de la raíz y, en consecuencia, una mayor tasa de absorción de agua y nutrientes (Dobbelaere *et al.*, 2002), lo que promovió la aparición de hojas y un mayor IAF. Resultados similares reportaron Uribe y Dzib (2006) con incrementos de 4% en el área foliar de la variedad de maíz V-539, con *Glomus* más *Azospirillum* para clima cálido subhúmedo en Muna, Yucatán. En cuanto a la DAFT, la máxima se presentó con Bio, debido a que aumentó la producción y longevidad de las hojas, por presentar un IAF de 4.8.

Nitrógeno

El N ocasionó cambios significativos para el NH, IAF y DAFT (Cuadro 2). A los 36 dds, con 80 y

160 kg N ha⁻¹ se incrementó en 14 y 10% el NH, respectivamente. Estos resultados indican que el N promovió una mayor aparición en el NH desde los 36 hasta la máxima, que fue a los 54 dds. La aplicación de nitrógeno en maíz incrementó el IAF, siendo el más alto a los 90 dds, a pesar de que no hubo diferencias significativas entre 80 y 160 kg N ha⁻¹, pero sí con el testigo. Datos similares fueron reportados por Quiroz y Marín (2000) en clima semiárido, con 120 kg N ha⁻¹, que obtuvieron un IAF de 4.8 a los 80 dds. En cuanto a la DAFT, la mayor se encontró con la aplicación de N, lo cual indica que cuando se aplica N se incrementa la eficiencia de la planta para producir materia seca (Naresh y Singh, 2001; Boomsma *et al.*, 2009).

Genotipo * Biofertilizante (G * Bio)

El ANDEVA para el NH, IAF y DAFT mostró diferencias significativas por efecto de la interacción G * Bio (Cuadro 3), lo cual demuestra que los genotipos presentaron respuestas diferentes a la aplicación del Bio. Así, Vandeño y H-562 presentó tendencia a incrementar la tasa de aparición de hojas e IAF, siendo el más alto a los 90 dds con el uso del Bio, en ambos genotipos. Esto indica que en los genotipos estudiados, el biofertilizante posiblemente aceleró la formación de hojas por área sembrada, lo cual aumentó el periodo de eficiencia del área foliar. El efecto positivo del Bio posiblemente se puede atribuir a un mejor desarrollo de la raíz y absorción de los nutrientes (Dobbelaere *et al.*, 2002).

Cuadro 3. Número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar total (DAFT, días) en genotipos de maíz en función del biofertilizante. Iguala, Gro. 2011.

Genotipo	Bio	NH				IAF				DAFT
		36	54	90	115	36	54	90	115	
- - - - - Días después de la siembra - - - - -										
Vandeño	Sin	45c	72ab	73a	43b	0.6c	4.0b	4.3b	2.4b	286b
	Con	51b	76a	76a	48a	1.3b	4.3ab	4.3b	2.7ab	329ab
H-562	Sin	51b	69b	70b	38c	1.3b	4.6ab	4.9a	3.0a	345a
	Con	60a	73a	73a	44b	1.7a	4.9a	5.0a	3.1a	362a
Tukey $P \leq 0.05$ (DMS)		2.3	2.4	2.3	2.3	0.1	0.4	0.4	0.4	33
Media general		52	72	72	43	1.2	4.4	4.7	2.8	331
CV (%)		5	3	3	6	16	12	11	18	11

En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). ** = $P \leq 0.05$, 0.01, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$. Bio = biofertilizante.

Genotipo * Nitrógeno (G * N)

Los genotipos presentaron respuesta diferente al N en el NH, IAF y DAFT (Cuadro 4). En Vandeño y H-562, la respuesta más alta al N en el desarrollo de las hojas fue a los 54 dds y en el IAF a los 36 dds, con 160 kg N ha⁻¹, respectivamente. Por lo cual, podemos señalar que la tasa de aparición de hojas está influenciada por un alto suministro de nitrógeno, además de que genera una mayor expansión foliar. Al respecto, Boomsma *et al.* (2009) encontraron que con la aplicación de 165 y 330 kg N ha⁻¹ se presentó el mayor IAF en diferentes genotipos de maíz. Por otro lado, también se observó que con la aplicación de nitrógeno se incrementó la DAFT en ambos genotipos. Esto indica que el N aumentó la DAFT que está relacionada con el crecimiento, y depende de la cantidad de hojas que están fotosintetizando (Woo *et al.*, 2004). En general, se pudo observar que los genotipos presentaron mayor respuesta con 160 kg N ha⁻¹.

Biofertilizante * Nitrógeno (Bio * N)

Con respecto a la interacción Bio * N, el ADEVA mostró cambios significativos para el NH, IAF y DAFT (Cuadro 5). Se observó que el cultivo con Bio y 160 kg N ha⁻¹ presentó mayor respuesta en el NH, IAF y DAFT, siendo el valor máximo hasta los 54 dds y a los 90 dds en IAF, lo cual indica que en la respuesta al suministro de N la influencia del Bio indujo un estímulo en el crecimiento vegetal (Roveda y Polo, 2007).

En contraste, el maíz sin Bio presentó mayor IAF y DAFT, particularmente con 80 kg N ha⁻¹ y el NH con 160 kg N ha⁻¹. Lo observado sugiere que la inoculación con Bio eleva la respuesta al N. En contraste, Uribe y Dzib (2006), en clima cálido subhúmedo, no encontraron incremento en el área foliar con el N al inocular con Bio.

Genotipo * Biofertilizante * Nitrógeno (G * Bio * N)

Se observaron diferencias significativas para NH, IAF y DAFT con respecto a la interacción G * Bio * N (Cuadro 6). La combinación H-562, Bio con 80 y 160 kg N ha⁻¹ fue la que presentó mayor IAF y DAF. Sin embargo, con Bio y 160 kg N ha⁻¹ se favoreció más la aparición de hojas y redujo la senescencia de las mismas. En Vandeño, Bio con 80 y 160 kg N ha⁻¹ se obtuvo el más alto NH, IAF y DAFT. En general, se observó una respuesta positiva al Bio en el IAF y DAFT, debido a que promovió una mayor duración y producción de AF por m². Esto contrasta con lo reportado por Uribe y Dzib (2006) en clima cálido subhúmedo, ya que no encontraron respuesta en el AF con Bio y N. Esto es atribuible a la variabilidad del genotipo y niveles de N, así como a la capacidad del Bio para establecerse (Pecina *et al.*, 2005).

Materia Seca Total (MS)

Se observaron diferencias significativas en la MS, en función del N (Figura 3). La producción de MS se ajustó a un polinomio de segundo grado. La más alta

Cuadro 4. Número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar total (DAFT, días) en genotipos de maíz en función del nitrógeno (N). Iguala, Gro. 2011.

Genotipo	N	NH				IAF				DAFT
		36	54	90	115	36	54	90	115	
	kg ha ⁻¹	----- Días después de la siembra -----								
Vandeño	0	46b	71b	71b	40c	0.82c	3.72a	4.05a	2.15a	271b
	80	51b	74ab	73ab	44b	1.07bc	4.40a	4.71a	2.81a	324ab
	160	48b	77a	77a	52a	1.17b	4.42a	4.72a	2.82a	328ab
H-562	0	49b	71b	71b	40c	1.30b	4.22a	4.53a	2.63a	316b
	80	59a	69b	73ab	38c	1.63a	4.92a	5.27a	3.36a	376a
	160	59a	73b	72b	46b	1.62a	4.86a	5.16a	3.26a	369ab
Tukey $P \leq 0.05$ (DMS)		2.3	2.4	2.3	2.3	0.1	0.4	0.4	0.4	33
Media general		52	72	72	43	1.2	4.4	4.7	2.8	331
CV (%)		5	3	3	6	16	12	11	18	11

En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). *,** = $P \leq 0.05, 0.01$, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$.

Cuadro 5. Número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar total (DAFT, días) del maíz en función del biofertilizante (Bio) y nitrógeno (N). Iguala, Gro. 2011.

Bio	N	NH				IAF				DAFT	
		36	54	90	115	36	54	90	115		
	kg ha ⁻¹	----- Días después de la siembra -----									Días
Sin	0	45c	70b	69b	39b	0.78b	4.17ab	4.48ab	2.58ab	300b	
	80	50b	69b	69b	39b	1.10ab	4.46ab	4.77ab	2.86ab	328ab	
	160	50b	73ab	73b	45b	1.15a	4.31ab	4.61ab	2.71ab	319ab	
Con	0	50b	72b	72b	41b	1.33a	3.77b	4.10b	2.20b	286b	
	80	60a	73ab	73b	44b	1.61a	4.90a	5.21a	3.31a	372a	
	160	57a	77a	77a	53a	1.65a	4.97a	5.27a	3.37a	378a	
Tukey $P \leq 0.05$ (DMS)		2.3	2.4	2.3	2.3	0.1	0.4	0.4	0.4	33	
Media general		52	72	72	43	1.2	4.4	4.7	2.8	331	
CV (%)		5	3	3	6	16	12	11	18	11	

En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). **, * = $P \leq 0.05, 0.01$, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$.

producción de MS por día se presentó en Vandeño con 80 kg N ha⁻¹, esto debido a una mayor eficiencia de Vandeño en la producción de MS del dosel por efecto del N. Sin embargo, en H-562 con 160 kg N ha⁻¹ fue donde se obtuvo la mayor producción de MS durante el desarrollo del cultivo. Con respecto al Bio, en Vandeño

con 160 kg N ha⁻¹ se observó un incremento significativo en la producción de MS, respecto al testigo sin Bio. Por ello se puede inferir que el biofertilizante probablemente tuvo mayor afinidad en el maíz criollo que en el híbrido. Asimismo, demuestra que el Bio favorece la absorción del nitrógeno, el cual repercute en el peso seco del dosel

Cuadro 6. Número de hojas (NH, m²), índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar total (DAFT, días) en genotipos de maíz en función del biofertilizante (Bio) y nitrógeno (N). Iguala, Gro. 2011.

Genotipo	Bio	N	NH				IAF				DAFT	
			36	54	90	115	36	54	90	115		
		kg ha ⁻¹	----- Días después de la siembra -----									Días
Vandeño	Sin	0	44b	69b	68b	38b	0.6b	4.0b	4.3b	2.4b	281b	
		80	49b	71b	70b	39b	0.7b	4.1b	4.4b	2.5b	289b	
		160	49b	83a	83a	52a	0.8b	4.0b	4.3b	2.4b	290b	
	Con	0	49b	74b	74b	42b	1.1ab	3.5b	3.8b	1.9b	261b	
		80	54a	79a	79a	49ab	1.5ab	4.8a	5.1a	3.2a	360ab	
		160	56a	80a	80a	45ab	1.5ab	4.9a	5.2a	3.3a	368ab	
H-562	Sin	0	46b	69b	69b	40b	1.0b	4.4b	4.7b	2.8b	320b	
		80	48b	68b	68b	38b	1.5ab	4.9a	5.2a	3.3a	368ab	
		160	54a	68b	68b	39b	1.5ab	4.6a	4.9ab	3.0ab	349ab	
	Con	0	60a	72b	72b	41b	1.6a	4.1b	4.4b	2.5b	313b	
		80	64a	74b	74b	39b	1.7a	5.0a	5.3a	3.4a	384a	
		160	64a	80a	80a	49ab	1.8a	5.1a	5.4a	3.5a	390a	
Media general			53	73	73	42	1.2	4.4	4.7	2.8	331	
Tukey $P \leq 0.05$ (DMS)			7	6	6	8	0.5	1.2	1.2	1.2	90	
CV (%)			5	4	4	7	17	12	11	18	11	

En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). **, * = $P \leq 0.05, 0.01$, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$.

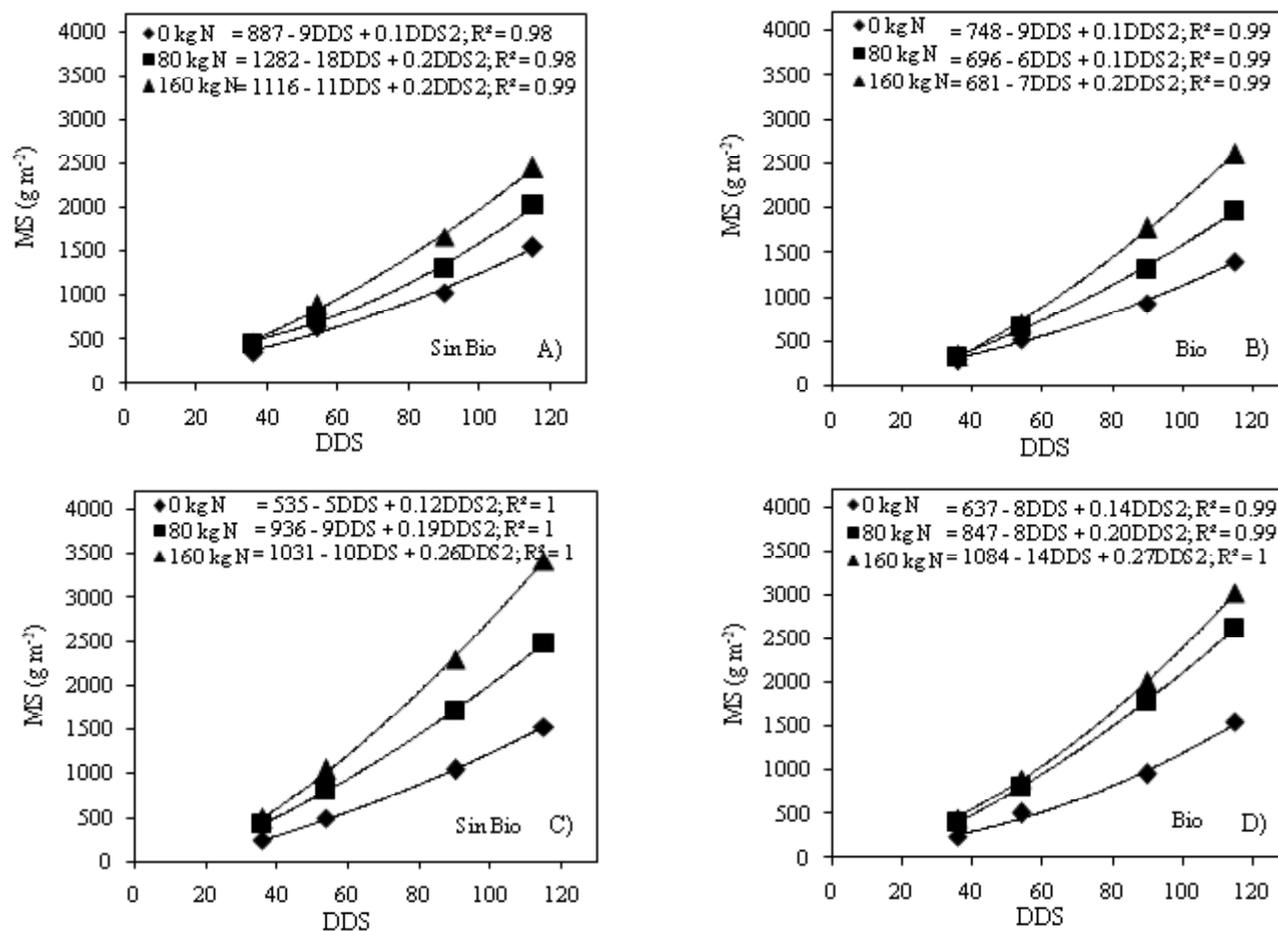


Figura 3. Dinámica de la materia seca total en maíz Vandeño (A y B) y H-562 (C y D) en función del nitrógeno y biofertilizante (Bio) (B y D) durante el ciclo del cultivo. Iguala, Gro. 2011.

vegetal. Al respecto, García *et al.* (2007) observaron incrementos en la MS desde los 26 dds con Bio, de manera similar a lo reportado en el presente estudio.

Tasa de Crecimiento del Cultivo (\overline{TCC})

La \overline{TCC} más alta se presentó en H-562 con aplicación de 160 kg N ha⁻¹ desde los 20 dds (Figura 4); la tendencia se ajustó a un modelo cuadrático, el cual indica que la producción por día fue de 0.60 g m⁻² d⁻¹, el N logró incrementar la eficiencia de la planta en la producción de MS (Woo *et al.*, 2004). En el caso del maíz Vandeño, la mayor \overline{TCC} se presentó con 160 kg N ha⁻¹ y Bio desde los 72 a los 102 dds. De acuerdo con el modelo de regresión cuadrática, la mayor producción de MS por día se obtuvo con 160 kg N ha⁻¹ y Bio, lo cual indica que la maquinaria fotosintética es

más eficiente en la producción de materia seca durante el desarrollo del cultivo por efecto del nitrógeno (Naresh y Singh, 2001) y Bio.

Tasa Media de Asimilación Neta (\overline{TAN})

En general, la \overline{TAN} más alta fue a los 20 dds, esto se observa en la Figura 5. El maíz Vandeño con 160 kg N ha⁻¹ presentó la \overline{TAN} más alta sin Bio a los 20 dds. De acuerdo con el modelo de regresión cuadrática, la mayor producción de MS por día se obtuvo con 0 y 80 kg N ha⁻¹. En cuanto a H-562, la mayor \overline{TAN} fue con 160 kg N ha⁻¹ y en el modelo cuadrático se observa que por cada día se producen 1.4 g m⁻² d⁻¹. De acuerdo con los resultados obtenidos, la \overline{TAN} mostró diferencias entre genotipos (Díaz-López *et al.*, 2013), en función del N. El aumento de la \overline{TAN} por efecto del

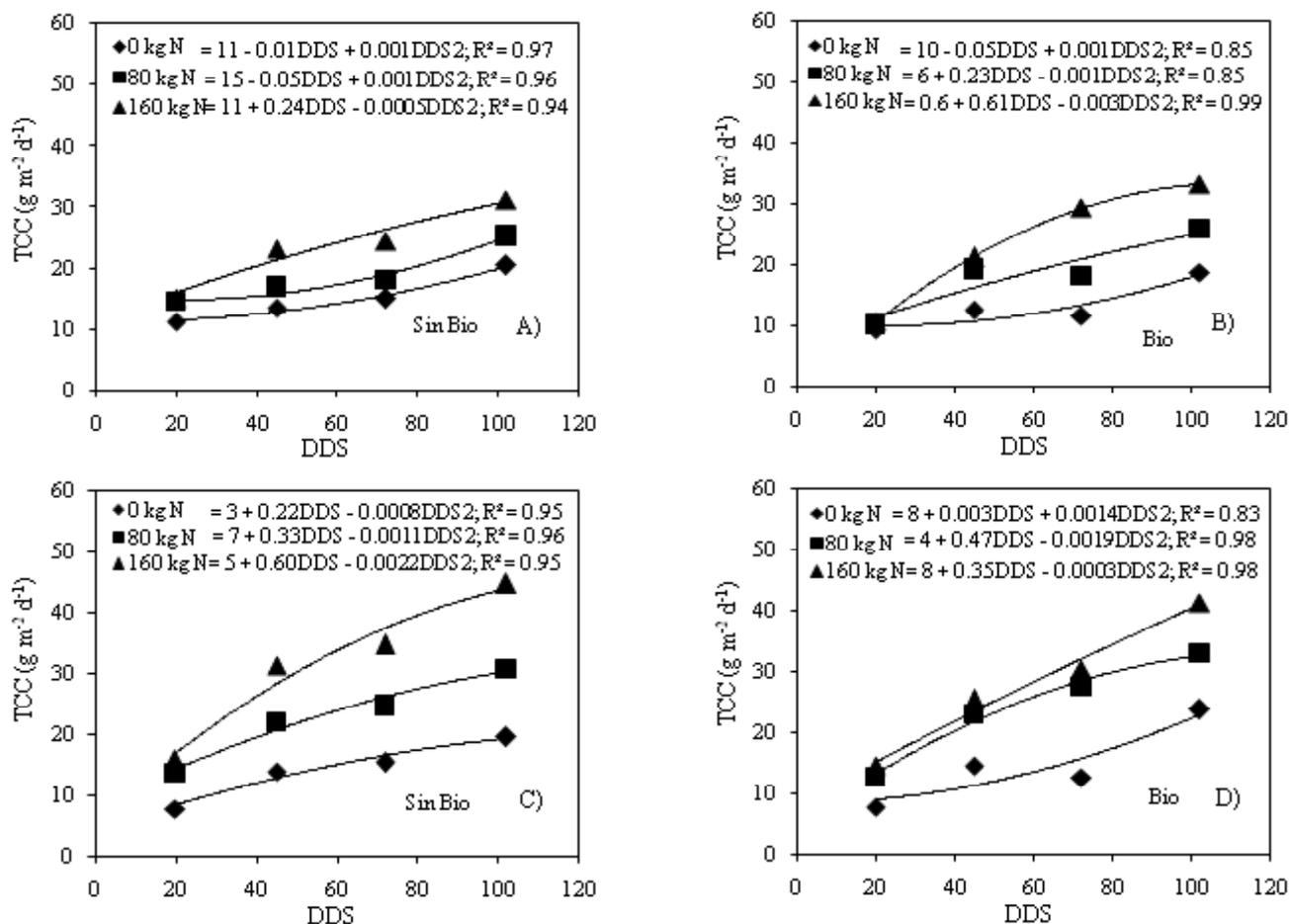


Figura 4. Dinámica de la tasa media de crecimiento del cultivo (\overline{TCC}) en maíz Vandeano (A y B) y H-562 (C y D) en función del nitrógeno y biofertilizante (Bio) (B y D). Iguala, Gro. 2011.

N ha sido relacionado con la máxima acumulación de MS de hojas, tallos y mazorca (Naresh y Singh, 2001).

Rendimiento de Grano

El ANDEVA mostró cambios significativos en el RG por efecto de la interacción $G * \text{Bio} * N$ (Figura 6). El RG más alto en ambos genotipo fue con 160 kg N ha^{-1} . Al utilizar el Bio, la respuesta no fue significativa. Solo se observó una respuesta positiva al Bio en H-562, en el testigo sin fertilizar. Los factores responsables de tales irregularidades son difíciles de identificar, pero se atribuye a la variabilidad del genotipo, así como la capacidad del biofertilizante para establecerse (Pecina *et al.*, 2005).

En síntesis, los resultados indican que la materia seca durante el desarrollo del cultivo y el rendimiento de grano a madurez fisiológica fueron más altos en H-562 con la aplicación de 160 kg N ha^{-1} ; esto se relacionó con el incremento del tamaño y duración del aparato biomolecular fotosintético (IAF y DAFT), el cual generó la \overline{TCC} y \overline{TAN} más alta. En cambio, con Vandeano la mayor respuesta se vio favorecida con el uso de biofertilizante y la aplicación de nitrógeno, el cual ocasionó un incremento en la materia seca total y, en menor medida, en el rendimiento de grano, producto de la mayor expansión, duración y velocidad de crecimiento del dosel vegetal (IAF, DAFT y \overline{TCC}).

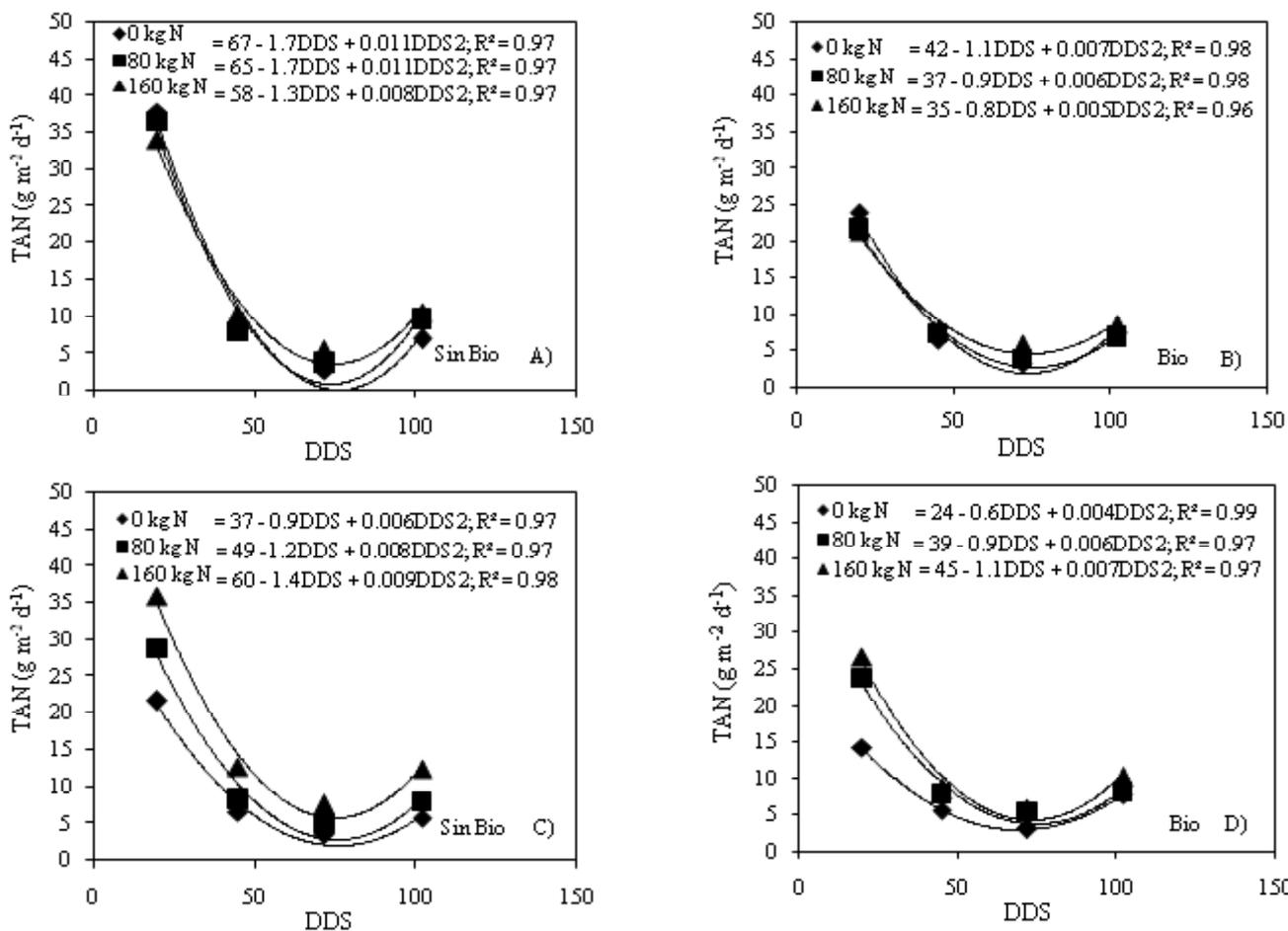


Figura 5. Dinámica de la tasa media de asimilación neta ($\overline{\text{TAN}}$) en maíz Vandeano (A y B) y H-562 (C y D) en función del nitrógeno y biofertilizante (Bio) (B y D). Iguala, Gro. 2011.

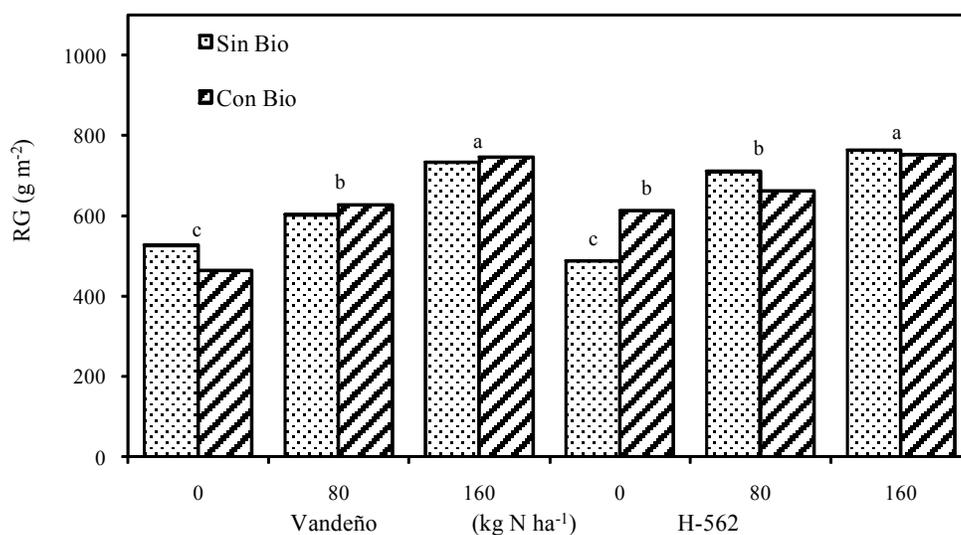


Figura 6. Rendimiento de grano (RG) en genotipos de maíz en función del biofertilizante (Bio) y nitrógeno (N). Iguala, Gro. 2011.

CONCLUSIONES

En Vandeño la aplicación del biofertilizante y 160 kg N ha⁻¹ incrementó la materia seca total durante el desarrollo del cultivo, pero no fue significativo para el rendimiento de grano. En cuanto al índice y duración de área foliar, el más alto fue con 80 y 160 kg N ha⁻¹, lo que ocasionó la mayor tasa de crecimiento del cultivo, pero no así en la tasa de asimilación neta. En relación a H-562, la más alta producción de materia seca total y rendimiento de grano fue con 160 kg N ha⁻¹, además de que incrementó el índice y duración de área foliar, que generó la más alta tasa de crecimiento del cultivo y asimilación neta.

LITERATURA CITADA

- Boomsma, C. R., J. B. Santini, M. Tollenaar, and T. J. Vyn. 2009. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: An analysis and review. *Agron. J.* 101: 1426-1452.
- Díaz-López, E., J. M. Loeza-Corte, J. M. Campos-Pastelín, E. J. Morales-Rosales, A. Domínguez-López y O. Franco-Mora. 2013. Eficiencia en el uso de la radiación, tasa de asimilación neta e integral térmica en función del fósforo en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 47: 135-146.
- Dobbelaere, S., C. Anja, T. Amber, P. David, Y. Okon, and 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. Fertil. Soils* 36:284-297.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje no. 24. Roma, Italia.
- Escalante E., J. A. y J. Kohashi Shibata. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. México, D. F.
- García O., J. G., V. R. Moreno, I. C. Rodríguez, A. Mendoza y N. Mayek. 2007. Efecto de cepas de *Azospirillum brasilense* en el crecimiento y rendimiento de grano del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 305-310.
- Kiniry, J. R. and R. Bonhomme. 1991. Predicting maize phenology. pp. 115-131. In: T. Hodges (ed.). *Physiological aspects of predicting crop phenology*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Naresh, K. S. and C. P. Singh. 2001. Growth analysis of maize during long and short duration crop seasons: Influence of nitrogen source and dose. *Indian J. Agric. Res.* 35: 13-18.
- Núñez-Hernández, G., R. Faz-Contreras, F. González-Castañeda y A. Peña-Ramos. 2005. Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *Téc. Pecu. Méx.* 43: 69-78.
- Ortiz S., C. A., M. C. Gutiérrez C. y J. Nieves F. 2005. Estimación de rendimiento de maíz con el método FAO en el ejido de Atenco, Estado de Méx. *Rev. Geog. Agríc.* 35: 57-65.
- Pecina Q., V., A. Díaz, H. Williams, E. Rosales e I. Garza. 2005. Influencia de fechas de siembra y biofertilizantes en sorgo. *Rev. Fitotec. Mex.* 28: 389-392.
- Pedrol, H. M., J. M. Castellarín, F. Ferraguti y O. Rosso. 2008. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. *Inf. Agron. Cono Sur* 40: 17-20.
- Quiroz, A. y D. Marín. 2000. Evaluación de la asociación maíz-quinchoncho, con siembra escalonada y dos niveles de fertilización. I. Fenología y crecimiento. *Agron. Trop.* 50: 99-122.
- Ritchie, S. W. and J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Special report No. 48. Ames, IA, USA.
- Roveda, G. y C. Polo. 2007. Mecanismos de adaptación de maíz asociado a *Glomus* spp. en suelos con bajo fósforo disponible. *Agron. Colomb.* 25: 349-356.
- Santos C., M., M. Segura A. y C. E. Nústez L. 2010. Análisis de crecimiento y relación fuente demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 63: 5253-5266.
- SAS Institute. 2003. SAS/STAT user's guide Release 9.1. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria). 2012. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SAGARPA. México. http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comanuar.html (Consulta: septiembre 12, 2012).
- Snyder, R. L. 1985. Hand calculating degree days. *Agric. For. Meteorol.* 35: 353-358.
- Tekalign, T. and P. S. Hammes. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and productive growth: II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Sci. Hortic.* 105: 29-44.
- Uribe V., G. y R. Dzib E. 2006. Micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*), *Azospirillum brasilense* y Brassinoesteroide en la producción de maíz en suelo luvisol. *Agric. Téc. Méx.* 32: 68-72.
- Villalpando, J. F. y A. Ruíz J. 1993. Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Limusa. México, D. F.
- Woo R., J. L., R. Vázquez A., E. Olivares S., F. Zavala G., R. González G., R. Valdez C. y C. Gallegos V. 2004. Análisis de crecimiento en maíz (*Zea mays* L.) aplicando lodos activados y urea. *Sistema de producción agropecuaria. Agrofaz* 4: 437-441.