

Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno

Agronomic efficiency, grain yield and profitability of maize genotypes in function of nitrogen

Cid Aguilar Carpio^{1‡}, José Alberto Salvador Escalante Estrada¹, Immer Aguilar Mariscal⁴, José Apolinar Mejía Contreras², Víctor Florentino Conde Martínez¹ y Antonio Trinidad Santos³

¹ Programa de Botánica, ² Programa de Genética, ³ Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

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

⁴ Facultad de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001 Col. Chamilpa. 62209 Cuernavaca, Morelos, México.

RESUMEN

En el cultivo de maíz, la fertilización nitrogenada es una alta inversión que posiblemente incrementa el rendimiento. Sin embargo, es imprescindible ser eficiente en el uso del agua y nitrógeno (N), para la producción. El nitrógeno mejora la composición de proteínas en el grano, pero de forma excesiva es perjudicial a la salud humana. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del nitrógeno en genotipos de maíz sobre: a) la ocurrencia de las fases fenológicas; b) producción de materia seca y rendimiento; c) eficiencia en el uso del agua y nitrógeno; d) contenido de nitrógeno y proteína en el grano; y e) rentabilidad en maíz. La siembra de los genotipos Michoacán-21, HS-2 y Promesa con 0, 80 y 160 kg N ha⁻¹, se realizó en Montecillo, Estado de México en junio de 2011. Se registró, la ocurrencia de las fases fenológicas y madurez fisiológica del maíz, la materia seca (MS), rendimiento de grano (RG), contenido de nitrógeno y proteína en el grano, eficiencia en el uso de agua y nitrógeno (EUA y EAN) y rentabilidad económica. Se observaron diferencias entre genotipos en la ocurrencia de las fases fenológicas. La respuesta al nitrógeno entre genotipos fue variable. El mayor MS y RG fue en el genotipo Promesa con 80 kg N ha⁻¹ y 160 kg N ha⁻¹ respectivamente. La EUA y EAN más alta, se obtuvo en Promesa con 80 kg N ha⁻¹. El contenido de nitrógeno y proteína más alto fue en el grano de maíz de HS-2 con 160 kg N ha⁻¹. El mayor ingreso neto (\$12 685.90) se logró con Promesa y 80 kg N ha⁻¹.

Palabras clave: fertilización; grano; urea.

SUMMARY

To increase maize yields, high investments in nitrogen fertilization are needed. Therefore, it is imperative to be efficient in the use of water and nitrogen (N) during production. Nitrogen improves the composition of proteins in grain, but in excess it is harmful to human health. The objective of the study was to determine the effect of nitrogen in genotypes of maize on a) occurrence of phenological phases, (b) dry matter production and yield, (c) water and nitrogen use efficiency, (d) nitrogen content and protein in grain, and e) profitability. The genotypes Michoacán-21, HS-2 and Promesa with 0, 80, and 160 kg N ha⁻¹ were planted in Montecillo, State of Mexico, in June 2011. The phenological phases, dry matter (DM), grain yield (GY), nitrogen content, protein, water and nitrogen use efficiency (WUE and NUE) as well as economic profitability at physiological maturity were recorded. Differences among genotypes in phenological phases were observed. The response to nitrogen among genotypes was variable. The highest DM was achieved with Promesa and 80 kg N ha⁻¹. The highest GY was obtained with Promesa with 160 kg N ha⁻¹. The highest WUE and NUE were achieved in Promesa with 80 kg N ha⁻¹. The highest content of nitrogen and protein was found in HS-2 with 160 kg N ha⁻¹. The highest net income (\$12 685.90) was achieved with Promesa and 80 kg N ha⁻¹.

Index words: fertilization; grain; urea.

Como citar este artículo:

Aguilar Carpio, C., J. A. Salvador Escalante Estrada, I. Aguilar Mariscal, J. A. Mejía Contreras, V. F. Conde Martínez y A. Trinidad Santos. 2016. Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 34: 419-429.

Recibido: abril de 2015. Aceptado: junio de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 419-429.

INTRODUCCIÓN

En México, el maíz es el cultivo más importante desde el punto de vista alimenticio, industrial, político y social. El consumo *per cápita* de maíz es de 330 g d⁻¹ (Reynoso *et al.*, 2014), con un contenido de proteína que puede oscilar entre 8 y 11% del peso del grano, que en su mayor parte se encuentran en el endospermo (Benítez y Pfeiffer, 2006). Se desarrolla en diferentes zonas edafoclimáticas, además de formar parte de los usos y costumbres de diversas regiones étnicas. Los principales estados productores de maíz en México son: Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Edo. de México y Chiapas. El Estado de México ocupa el cuarto lugar, con una producción de 1 575 300 toneladas, donde el 84% (467 578 ha) de la superficie sembrada es bajo condiciones de lluvia estacional (LLE), la precipitación media del estado es de 558 mm con rendimiento promedio de 2.97 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2011). Los agricultores de riego prefieren el uso de semillas híbridas, por su alto potencial de producción y sus características agronómicas favorables como tolerancia a enfermedades, resistencia al acame y ciclo vegetativo corto (Espinosa *et al.*, 2003), y los de LLE prefieren los nativos que seleccionan ciclo tras ciclo. Por lo cual, se deben explorar las variedades que conviene sembrar en cada agrosistema y el manejo más apropiado para una mayor producción. En la agricultura es imprescindible ser eficiente en el uso del agua (EUA) y nitrógeno (N), ya que estos son los insumos más importantes para la producción, deben estar bien provistos en cantidad y oportunidad para asegurar un estado fisiológico óptimo al momento de la floración, que es cuando se determina el rendimiento (Andrade *et al.*, 2002). La EUA se incrementa con la aplicación de nitrógeno. En un estudio realizado por Faraldo *et al.* (2011) en tres híbridos de maíz se obtuvo una EUA de 0.89 en el 2009 y para el 2010 se incrementó a 2.28 g m⁻² mm⁻¹. El nitrógeno en las plantas estimula el crecimiento de las raíces, permitiendo que el cultivo aproveche la humedad del subsuelo y a su vez el crecimiento del dosel vegetal (Morales y Escalante, 2007), que cubre el suelo, con el cual se reduce la evaporación (Parker, 2000). La fertilización nitrogenada es determinante para incrementar el rendimiento de maíz (Borrás, 2001). Sin embargo, representa una inversión de alto costo y riesgo ambiental. Al respecto, Turrent-Fernández *et al.* (2004) al realizar un análisis económico en maíces de Chiapas, Guerrero y Quintana Roo, con 0, 80 y 160 kg N ha⁻¹

observó que a medida que se incrementan los insumos, aumenta el costo de producción y disminuye el ingreso neto. La incorporación de nitrógeno en el suelo es muy importante, debido a que la mayoría de los suelos agrícolas presentan niveles bajos de este nutrimento (p. ej.: 3.46 ppm, para Montecillo, Estado de México, Cruz-Flores *et al.*, 2002). Al respecto, Pecina *et al.* (2011), al evaluar cuatro variedades de maíz de los Valles Altos en Texcoco, Edo de México, con una fertilización de 120 kg N ha⁻¹, encontró diferentes respuestas genotípicas en el rendimiento de grano (RG), desde 5.5 hasta 8.5 Mg ha⁻¹. Antuna *et al.* (2003) evaluó seis líneas endogámicas de maíz en los estados de Durango y Coahuila, los cuales presentaron variabilidad desde 1.94 hasta 5.04 Mg ha⁻¹ en el RG. Domínguez *et al.* (2001) reportó incrementos en el rendimiento del maíz de 1770, 2250 y 1200 kg ha⁻¹, con aplicación de 60, 120 y 180 kg N ha⁻¹, con respecto al testigo (sin N aplicado). Por otra parte, la aplicación de nitrógeno puede aumentar el RG, pero también elevar el contenido de proteínas y aminoácidos en los productos agrícolas (Yu-kui *et al.*, 2009). La composición química del grano, está definida por el factor genético, pero también depende de las prácticas de cultivo, condiciones climáticas y tipo de suelo (Agama-Acevedo *et al.*, 2011). Por ejemplo, Agama-Acevedo *et al.* (2011), en cuatro maíces de la raza Chalqueño en el Edo. de México, encontraron diferencias significativas en el contenido de proteína y nitrógeno, en el grano. Las proteínas, del grano de maíz han sido estudiadas ampliamente, su función es servir como fuente de nitrógeno para el germinado de la semilla (Benítez y Pfeiffer, 2006), pero el excesivo e inapropiado uso de la fertilización nitrogenada, puede causar una alta acumulación de este insumo en el grano, lo cual puede ser perjudicial a la salud humana, además de contaminar el ambiente y generar pérdidas económicas (Stagnari *et al.*, 2007). Álvarez *et al.* (2003) mencionan, que cuando se incrementa el nitrógeno existe un máximo a partir del cual no se observa respuesta en el rendimiento del grano.

La respuesta sobre el rendimiento, contenido de N y proteína en el grano de maíz a la fertilización nitrogenada puede variar en función del genotipo, nivel inicial de N en el suelo y el ambiente de desarrollo (López *et al.*, 2007). Los reportes sobre el tema en clima templado no son abundantes. Por lo que, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del nitrógeno en tres genotipos de maíz sobre: a) la ocurrencia de

las fases fenológicas; b) la producción de materia seca, rendimiento y sus componentes; c) eficiencia en el uso del agua y nitrógeno; d) el contenido de nitrógeno y proteína en el grano, y e) la rentabilidad de la siembra del maíz bajo régimen de lluvia estacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un régimen de lluvia estacional en Montecillo, Estado de México, con clima templado (BS₁) (García, 2005), con lluvias en verano (precipitación anual de 558 mm) y altitud de 2240 m. Los tratamientos consistieron en sembrar el 01 de junio de 2011 el maíz nativo Michoacán 21, una variedad sintética HS-2 y el híbrido Promesa con tres niveles de fertilización nitrogenada 0, 80 y 160 kg ha⁻¹. La densidad de población fue de 6.25 pl m⁻² y una distancia entre surcos de 80 cm. El diseño experimental fue bloques completamente al azar con arreglo de parcelas divididas y cuatro repeticiones.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + \beta_k + \epsilon_i \beta_k + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

donde: Y_{ijk} , es la variable respuesta del i -ésimo nivel A (genotipo), en el i -ésimo nivel B (nivel de nitrógeno) en el j -ésimo bloque. μ , es la media general verdadera. A_i , es el efecto del i -ésimo genotipo. β_k , es el efecto del k -ésimo repetición. $\epsilon_i \beta_k$ es el error del genotipo B_j , es el efecto del j -ésimo nivel de nitrógeno. $(AB)_{ij}$, es el efecto de la interacción del i -ésimo genotipo, en la j -ésimo nivel de nitrógeno. ϵ_{ijk} , es el error experimental.

La unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m de ancho \times 4 m de longitud. Los resultados indican que fue un suelo de textura franco arcillo arenosa, densidad aparente de 1.22 g cm⁻³, pH 8.2, conductividad eléctrica 0.41 dS m⁻¹, materia orgánica de 1.70% y nitrógeno total de 3.46 ppm. Durante el desarrollo del estudio se registró la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) decenal y la suma de la evaporación (E_v , mm) y precipitación (PP , mm), datos proporcionados por la estación Agrometeorológica del Colegio de postgraduados. También se registró la ocurrencia de las fases fenológicas como: días a emergencia (E), floración (FL) y a madurez fisiológica (MF). El criterio utilizado para el registro fue 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 Ecuación 2 (Snyder, 1985):

$$UC = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}} / 2) - TB \quad (2)$$

donde: UC = unidades calor (°C d), $T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima diaria (°C), $T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima diaria (°C) y TB = temperatura base, considerada como 7 °C (García y López, 2002). La evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) se calculó a partir de los datos de la evaporación (E_v) 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 Ecuación 3:

$$E_{Tc} = E_v \times 0.6 \times K_c \quad (3)$$

A la MF se evaluó la biomasa con base en materia seca total (MS total, g m⁻²), índice de cosecha (IC, %), rendimiento de grano (RG, 10% de humedad, g m⁻²), peso de 100 granos (P100G, g), número de granos (NG, m²), número de hileras (NH) y número de granos por hilera (NGH). Se calculó la eficiencia en el uso del agua del RG (EUARG, g m⁻² mm⁻¹) y MS (EUAMS, g m⁻² mm⁻¹) con la ecuación, $EUA = RG$ o MS (g m⁻²) / E_{Tc} (mm) ocurrida durante el ciclo del cultivo (Escalante, 1995) y la eficiencia agronómica del N (EAN, g g⁻¹ de N aplicado), considerado como el incremento en el rendimiento por unidad de fertilizante aplicado, se calculó a través de la siguiente ecuación: $EAN = RGN - RGSN / NA$. Donde: RGN = rendimiento de grano con nitrógeno (g m⁻²), RGSN = rendimiento de grano sin nitrógeno (g m⁻²) y NA = cantidad de nitrógeno aplicado (g m⁻²) (Fageria y Baligar, 2005).

Adicionalmente, posterior a la cosecha de grano, se determinó el contenido de nitrógeno total en las semillas de maíz, mediante el método de semi micro Kjeldahl, modificado para incluir nitratos (Chapman y Pratt, 1979). Se analizaron 454 muestras de material vegetal (10 g por muestra, grano).

A los datos del rendimiento y sus componentes, así como a la eficiencia en el uso del agua y nitrógeno, contenido de nitrógeno y proteína, se les aplicó un análisis de varianza (ANDEVA), con el programa estadístico de SAS (Statistical Analysis System, Versión 9.0), la prueba de comparación de medias Tukey ($\alpha = 0.05$).

Adicionalmente, se realizó un análisis económico para rendimiento, utilizando las siguientes Ecuaciones 4 y 5:

$$IN = YPy - (\Sigma XiPi + CF) \quad (4)$$

donde: IN = ingreso neto, Y = rendimiento (kg ha⁻¹), Py = precio por kg, $\Sigma XiPi$ = suma de costos variables, CF = costos fijos (Volke, 1982).

También se determinó la GPI con la relación:

$$GPI = (\Sigma XiPi + CF) / YPy \quad (5)$$

donde: GPI = ganancia por peso invertido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología, Condiciones Climáticas, Unidades Calor y Evapotranspiración

La media decenal de la T_{máx} y T_{mín} durante el desarrollo del cultivo fluctuó entre 31 y 21 °C, y entre 13 y 8 °C, respectivamente. Durante la etapa de siembra (S) a FL, la T_{máx} y T_{mín} promedio fue de 31 y 8 °C y de FL a MF fue de 25 y 8 °C, respectivamente (Figura 1). Dichos valores se encuentran dentro del umbral térmico en promedio de 18 a 22 °C apropiado para cultivares de maíz adaptados a los valles altos de México (Pecina *et al.*, 2011), lo cual indica que en

los genotipos estudiados la temperatura no fue limitante para una mayor expresión del rendimiento. La suma de la PP durante el ciclo del cultivo fue de 504 mm. Valor ligeramente inferior al señalado por Rivetti (2006) quien menciona que las necesidades de agua para el ciclo del maíz son de 575 mm aproximadamente. La mayor PP (374 mm) ocurrió en la etapa de S a FL de los genotipos, en los meses de junio y julio. Sin embargo, de FL a MF la PP fue más baja (129 mm). Esto limitó una mayor expresión del RG (Faraldo *et al.*, 2011).

Los genotipos en estudio, presentaron diferencias en las fechas a ocurrencia de las etapas fenológicas, con excepción de la emergencia donde fue similar (6 dds) con un requerimiento de calor de 69 °C d. En contraste, la floración de Michoacán-21 ocurrió a los 84 dds con UC de 866 °C d, en HS-2 a los 92 dds con UC de 953 °C d y en Promesa a los 90 dds con UC de 1003 °C d. La MF en Michoacán-21 fue a los 140 dds (1452 °C d), en HS-2 y en Promesa a los 146 dds con UC de 1490 °C d (Figura 1). En referencia, Díaz-López *et al.* (2013) reportaron en el ciclo del cultivo de maíz, requerimiento térmico de 1158 UC, valor inferior al encontrado en el presente estudio.

La acumulación de UC y la Etc durante el ciclo del cultivo, mostró una relación lineal con el tiempo que respondió al modelo $y = a + bx$. En cuanto a la Etc, del periodo de S a E fue de 12 mm, para todos los genotipos. De S a FL fue de 218, 241 y 231 mm para Michoacán-21, HS-2 y Promesa, respectivamente.

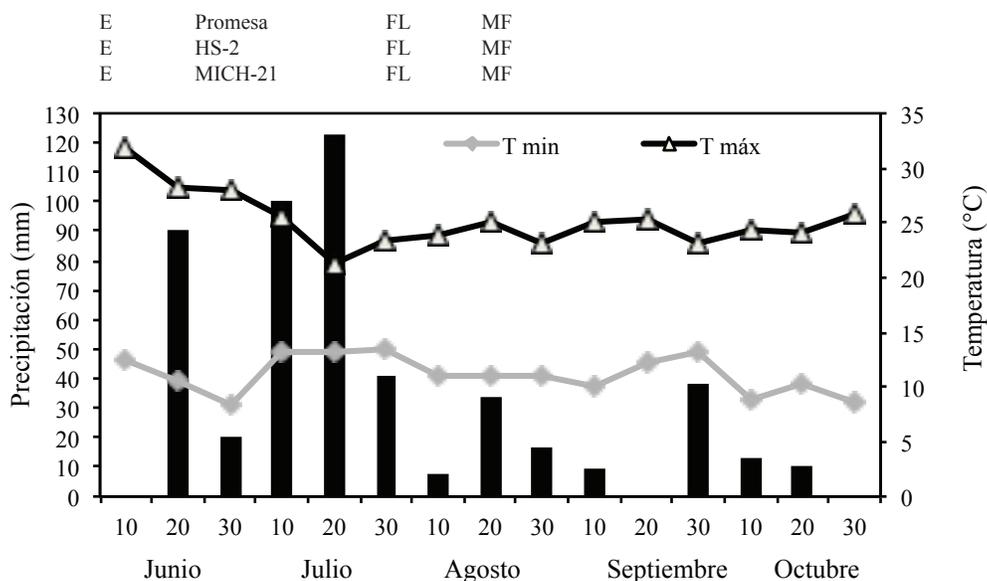


Figura 1. Medias decenales de la temperatura máxima (T_{máx}, °C), mínima (T_{mín}, °C) y suma decenal de la precipitación, durante el ciclo del cultivo de los maíces Michoacán-21, HS-2 y Promesa. E = emergencia; FL = floración; MF = madurez fisiológica. Montecillo, Estado de México, 2011.

De FL a MF fue de, 179, 171 y 181 mm para Michoacán-21, HS-2 y Promesa, respectivamente. La ETc total fue de 397 mm para Michoacán-21 y de 412 mm para HS-2 y Promesa (Figura 2). Esto indica que las necesidades de agua del cultivo difieren entre genotipos, por el mayor ciclo de crecimiento son más altos para HS-2 y Promesa.

Materia Seca Total (MS), Índice de Cosecha (IC), Rendimiento (RG) y sus Componentes

El MS, IC, RG y NGH mostraron cambios significativos debido a los diferentes genotipos (G), dosis de nitrógeno (N) y la interacción genotipo \times nitrógeno (G \times N). También se observaron diferencias en el P100G, entre G y N; en el NH y NG debido a N y en la interacción G \times N (Cuadro 1).

Desarrollo de los diferente genotipos. En cuanto a la MS, se observó que los cultivares mejorados superaron en 25 y 45% al nativo (Cuadro 2). El genotipo Promesa por su ciclo de crecimiento más largo tuvo oportunidad de interceptar mayor cantidad de radiación, lo que generó un incremento del 45% en MS con respecto a Michoacán-21 de ciclo más corto. En relación al IC, los genotipos Michoacán-21 y Promesa, estadísticamente presentaron similar distribución de MS hacia el grano. Esto indica que las diferencias en MS y RG entre Michoacán-21 y Promesa, son en la misma proporción. Promesa presentó el RG más alto (323 g m⁻²), mayor P100G, seguido de HS-2 y Michoacán-21 (236 g m⁻²).

Nitrógeno. Las diferentes aplicaciones de N ocasionaron incrementos significativos en la MS, IC, RG y sus componentes. La aplicación de 80 y 160 kg N ha⁻¹ incrementó en 251 g m⁻² la MS y el IC en 26%, con respecto a la nula fertilización (Cuadro 2), lo que indica que con la aplicación de N se promovió una mayor acumulación de MS hacia el grano respecto al resto de las estructuras de la planta, generado esto por un mayor tamaño de la demanda. Con 160 kg N ha⁻¹ el RG aumentó en promedio 105 g m⁻², esto fue atribuible al P100G y NG, con respecto al testigo (sin nitrógeno). Esto se relaciona con la disponibilidad de N inicial en el suelo, así como durante el llenado de grano (D'Andrea *et al.*, 2008). Otros estudios reportan incrementos en el RG del maíz con 160 kg N ha⁻¹ (Arrieché y Ruiz, 2010; Martínez- Rueda *et al.*, 2010). Estos resultados indican que el suministro de N al suelo, es necesario para incrementar la producción de MS, IC, NH, NGH, NG y P100G en la mazorca y en consecuencia el RG. Dicha respuesta se ha encontrado en otros casos donde se aplicó N, en el NG, P100G, RG, IC y MS (O'Neil *et al.*, 2004; Rasheed *et al.*, 2004; Khaliq *et al.*, 2009).

Genotipo \times Nitrógeno (G \times N). La respuesta a las diferentes dosis de N para MS y RG del maíz fue en función del genotipo (Figura 3). Así, para Promesa y HS-2 la respuesta a la aplicación de N se ajustó a un polinomio de segundo grado. En Promesa (7.9 g m⁻² por kg de N) fue superior al de HS-2 (3.8 g m⁻² por kg de N ha⁻¹) y en Michoacán-21 (2.3 g m⁻² por unidad de N) que fue la más baja (Figura 3A). En Promesa,

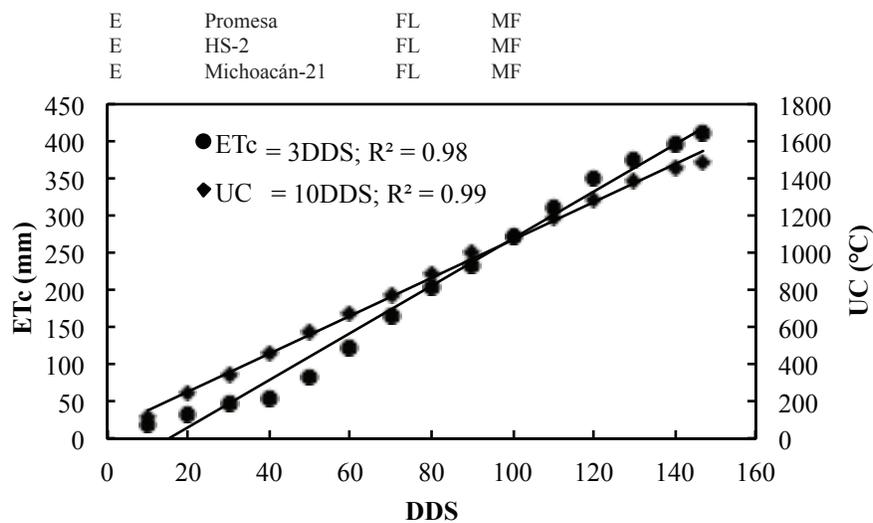


Figura 2. Unidades calor (UC); días después de la siembra (DDS); evapotranspiración (ETc) y fenología durante el ciclo del cultivo en los cultivares de maíz Michoacán-21, HS-2 y Promesa. E = emergencia; FL = floración; MF = madurez fisiológica. Montecillo, Estado de México, 2011.

Cuadro 1. Análisis de varianza para materia seca (MS), índice de cosecha (IC), rendimiento (RG) y sus componentes en genotipos de maíz en función del nitrógeno (N). Montecillo, Estado de México, 2011.

Factor	MS	IC	RG	P100G	NH	NGH	NG
	g m ⁻²	%	g m ⁻²	g			m ⁻²
G	**	**	**	**	NS	**	NS
N	**	**	**	**	**	**	**
G × N	*	**	**	NS	**	**	**

*, ** = $P \leq 0.05, 0.01$, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$; P100G = peso 100 granos; NH = número de hileras; NGH = número de granos hilera-1; NG = número de granos; G = genotipo.

la máxima producción de MS se logró con 80 kg N ha⁻¹; mientras que para HS-2 y Michoacán-21 se encontró con 160 kg N ha⁻¹. Esto indica una mayor eficiencia en el uso del N por el genotipo Promesa.

En cuanto a la respuesta a las diferentes aplicaciones de N para RG, se observó una tendencia cuadrática para los genotipos en estudio (Figura B). Así, la mayor respuesta al N se encontró con la aplicación de 80 y 160 kg N ha⁻¹. El RG de Promesa superó en 40 y 44%, con respecto a Michoacán-21 y HS-2 en cualquier nivel de N aplicado. Esto demuestra el potencial del híbrido Promesa y que tan eficiente es en el uso del nitrógeno. Respuestas variables al N entre genotipos de maíz también han sido reportadas por De la Cruz-Lázaro *et al.* (2009), Mamani-Pati *et al.* (2010) en Villahermosa, Tabasco.

Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) y Eficiencia Agronómica del Nitrógeno (EAN)

En cuanto a la EUAMS, se observó que los cultivares mejorados fueron más eficientes en el uso del agua que el nativo (Cuadro 3). El genotipo Promesa por su mayor cantidad de MS, generó la EUAMS más alta, con respecto a HS-2 y Michoacán-21. En relación al EUARG, Promesa mostró la más alta, debido a sus características genéticas (Faraldo *et al.*, 2011), seguido de HS-2 y Michoacán-21, que presentó la EUARG más baja. Las aplicaciones de N ocasionaron incrementos significativos en el EUAMS y EUARG que fueron similares con 80 y 160 kg N ha⁻¹ (Cuadro 3). Respuestas semejantes fueron reportadas por López *et al.* (2001). La EUAMS y EUARG mostraron diferencias significativas en la interacción Genotipo × dosis de N (Cuadro 3). La EUAMS más alta se encontró en el genotipo Promesa con 80 y 160 kg N ha⁻¹ seguido de HS-2 con 80 y 160 kg N ha⁻¹. La EUAMS más baja se encontró en Michoacán-21 y HS-2 sin N. Esto indica que la EUA más alta es consecuencia de un mayor tamaño de dosel y cobertura del suelo (Caviglia y Sadras, 2001), debido a diferencias genotípicas y N aplicado. La EUARG más alta se observó en Promesa con 80 y 160 kg N ha⁻¹ (Cuadro 3), seguido de Michoacán-21 con 80 y 160 kg N ha⁻¹. La EUARG más baja correspondió a Michoacán-21 y HS-2 sin aplicación de N. Esto indica que el genotipo Promesa presenta una eficiencia más alta en el uso del agua (Howell, 2001).

Cuadro 2. Materia seca (MS), índice de cosecha (IC), rendimiento (RG) y sus componentes de genotipos de maíz en función del nitrógeno (N) aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Factor		MS	IC	RG	P100G	NH	NGH	NG
		g m ⁻²	%	g m ⁻²	g			m ⁻²
Genotipo	Michoacán-21	860 c	27 a	236 b	27 a	16.3 a	22 b	2281 a
	HS-2	1076 b	22 b	240 b	22 b	14.8 a	26 a	2468 a
	Promesa	1250 a	25 a	323 a	28 a	15.1 a	25 a	2437 a
Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)		120	3	4.8	2.5	1.6	2.5	450
N (kg ha ⁻¹)	0	895 b	22 b	198 b	20 c	14 b	22 c	2000 b
	80	1146 a	26 a	298 a	27 b	16 a	24 b	2468 a
	160	1146 a	26 a	303 a	29 a	16 a	27 a	2718 a
Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)		77	2.1	5.1	1.1	1.6	1.7	250
Media general		1062	25	266	25	15	24	2393
CV (%)		6	6	0.9	8	6	4	10

En columnas para cada factor principal letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$). P100G = peso 100 granos; NH = número de hileras; NGH = número de granos hilera-1; NG = número de granos.

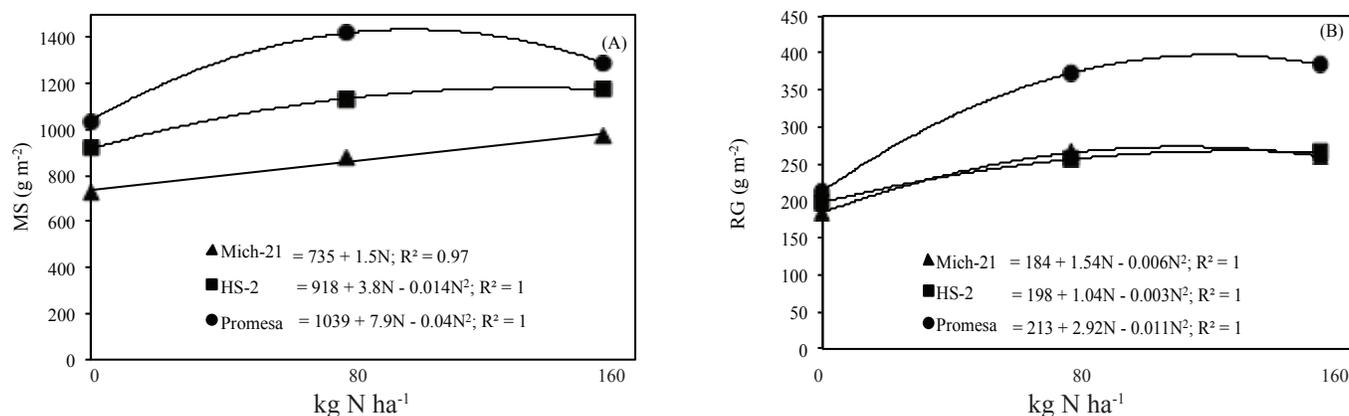


Figura 3. (A) Materia seca total (MS) y (B) rendimiento de grano (RG) en genotipos de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada al suelo. Montecillo, Estado de México, 2011.

En cuanto a la EAN, se observaron diferencias significativas con respecto al factor genotipo. El genotipo Promesa demostró ser más eficiente en el uso del N, respecto de HS-2 y Michoacán-21 (Cuadro 3). Al respecto, Hernández *et al.* (2003)

también encontraron diferencias entre genotipos en la eficiencia en el uso del N en maíz. Por otra parte, con N también se observaron incrementos significativos en la EAN. Con 80 kg N ha⁻¹ se logra la más alta EAN, seguido de 160 kg N ha⁻¹, lo que indica que el N

Cuadro 3. Eficiencia en el uso del agua (EUA) y eficiencia agronómica de nitrógeno (EAN) en genotipos de maíz en función del nitrógeno aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	Nitrógeno aplicado al suelo kg N ha ⁻¹	EUAMS g m ⁻² mm ⁻¹	EUARG	EAN g g ⁻¹
Michoacán-21		2.16 c	0.59 b	4.98 b
HS-2		2.61 b	0.58 c	3.78 c
Promesa		3.03 a	0.78 a	10.27 a
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.29	0.01	0.22
	0	2.19 b	0.48 b	-
	80	2.80 a	0.73 a	12.4 a
	160	2.81 a	0.74 a	6.5 b
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.18	0.01	0.40
Michoacán-21	0	1.83 c	0.46 f	-
	80	2.21 c	0.67 c	10.18 b
	160	2.45 bc	0.65 c	4.76 d
HS-2	0	2.23 c	0.48 f	-
	80	2.75 b	0.62 d	7.21 c
	160	2.85 b	0.64 d	4.15 e
Promesa	0	2.52 bc	0.51 e	-
	80	3.45 a	0.90 b	20.07 a
	160	3.13 ab	0.93 a	10.73 b
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.29	0.01	0.22
	Media general	2.60	0.65	6.34
	CV (%)	6.40	1.20	3.46

En columnas para cada factor principal letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

promovió una mayor EAN, después de la cual dicha eficiencia disminuye. Dicha respuesta se relaciona con lo mencionado en Álvarez *et al.* (2003), quienes observaron alta eficiencia con bajo contenido de nitrógeno.

La EAN más alta correspondió a Promesa con 80 kg N ha⁻¹; seguido de la aplicación de 160 kg N ha⁻¹. La EAN más baja correspondió a Michoacán-21 y HS-2 con 160 kg N ha⁻¹. Esto indica que Promesa presenta ventajas fisiológicas sobre Michoacán-21 y HS-2 por ser más eficiente en el uso de los insumos. Una EAN superior a la encontrada en el presente estudio fue reportada por Barbieri *et al.* (2003). Dicha diferencia puede deberse al diferente genotipo y prácticas de manejo.

Contenido de Nitrógeno y Proteína

El contenido de N y proteína, presentó diferencias significativas entre genotipos. El maíz HS-2 y Michoacán-21 mostraron los contenidos de N y proteína más altos con respecto a Promesa que fue el más bajo (Cuadro 4). Variabilidad en el contenido de N y proteína entre genotipos de maíz también han sido reportadas por Mendoza *et al.* (2006) y Hernández *et al.* (2003).

En relación a la aplicación de N, se observó diferencias en el contenido de N y proteína en el grano (Cuadro 4). Respuestas similares en maíz han sido reportadas por López *et al.* (2007), Rasheed y Mahmood (2004) y Shapiro y Wortmann (2006), en donde se observaron aumentos significativos en el contenido de N y proteína en el grano de maíz, por efecto de la fertilización nitrogenada.

En cuanto a la interacción G × N se observaron diferencias significativas para el contenido de N y proteína del grano (Cuadro 4). Esto indica que el efecto de la fertilización con N favoreció su absorción y asimilación por la planta para finalmente concentrarse en el grano (Zepeda *et al.*, 2007). El genotipo HS-2 con 160 kg N ha⁻¹ presentó la mayor acumulación de N y proteína en el grano (1.76 y 11%, respectivamente), Promesa presentó una tendencia similar, no así para Michoacán-21. Al respecto Yu-kui *et al.* (2009) y Zepeda-Bautista *et al.* (2009), señalan que la aplicación de N puede incrementar el contenido de proteína del grano de maíz. El contenido de nitrógeno y proteína del grano encontrado en el presente estudio fue superior

al reportado por Agama *et al.* (2011), para cuatro cultivares de maíz de la raza Chalqueño cultivados en el Edo. de México (N 1.49% y proteína 9.36%).

Análisis Económico

En cuanto al análisis económico para el RG se observó que la siembra del maíz Promesa con 80 kg N ha⁻¹ generó el mayor ingreso neto (IN), al igual que la ganancia por peso invertido (GPI). Así, por cada peso invertido, se recuperó \$ 1.61 (Cuadro 5). Para agricultores de capital limitado se recomienda el uso de Promesa, debido a que genera el mayor IN sin aplicación de N (\$0.85 por peso invertido). Al respecto Turrent-Fernández *et al.* (2004) en Chiapas, Quintana Roo, Veracruz y Guerrero en siembra con riego, observaron el más alto IN con los híbridos H-516 y H-515, con la más alta fertilización (160 kg N ha⁻¹).

Cuadro 4. Contenido de nitrógeno y proteína en genotipos de maíz en función de la aplicación de nitrógeno al suelo. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	Nitrógeno aplicado al suelo	Nitrógeno en grano	Proteína
	kg N ha ⁻¹	----- % -----	
Michoacán-21	0	1.63 ab	10 a
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.05	0.3
HS-2	0	1.65 a	10 a
	160	1.64 a	10 a
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.07	0.5
Promesa	0	1.59 b	9 b
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
Michoacán-21	0	1.63 b	10 b
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
HS-2	0	1.54 c	10 b
	160	1.76 a	11 a
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
Promesa	0	1.54 c	9 c
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
	Media general	1.62	10
	C. V. (%)	1.8	1.8

En columnas para cada factor letras similares indican que son estadísticamente iguales (Tukey, α = 0.05).

Cuadro 5. Rendimiento (RG), ingresos totales (IT), costos fijos (CF), costos variables (CV) y costos totales (CT), ingresos netos (IN) y ganancia por peso invertido (GPI) en genotipos de maíz en función del nitrógeno (N) aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	N	RG	IT	CF	CV	CT	IN	GPI
	kg ha ⁻¹					\$		
Michoacán-21	0	1842	10131	5033.6	340	5373.6	4757.4	0.89
	80	2652	14586	5033.6	1863	6896.6	7689.4	1.11
	160	2605	14327.5	5033.6	3286	8319.6	6007.9	0.72
HS-2	0	1987	10928.5	5033.6	1300	6333.6	4594.9	0.73
	80	2565	14107.5	5033.6	2823	7856.6	6250.9	0.8
	160	2650	14575	5033.6	4246	9279.6	5295.4	0.57
Promesa	0	2130	11715	5033.6	1300	6333.6	5381.4	0.85
	80	3735	20542.5	5033.6	2823	7856.6	12685.9	1.61
	160	3847	21158.5	5033.6	4246	9279.6	11878.9	1.28

IT = RG precio por kg de maíz (\$ 5.50); CF = incluye costo de preparación del terreno, siembra, riego, manejo de maleza y plagas; CV = incluye el costo de la fertilización y cosecha de maíz.

Esto contrasta con los resultados de este estudio, ya que se presentó el mayor IN con 80 kg N ha⁻¹ en Promesa, HS-2 y Michoacán-21. Dichas diferencias se relacionan con los diferentes genotipos utilizados, diferente suministro de agua y condiciones ambientales.

CONCLUSIÓN

- Los genotipos en estudio presentaron diferencias en la ocurrencia de las fases fenológicas. Promesa presentó mayor respuesta al nitrógeno que HS-2 y Michoacán-21. La aplicación de nitrógeno 80 y 160 kg ha⁻¹ incrementaron la eficiencia en el uso del agua, eficiencia agronómica de nitrógeno, producción de materia seca y rendimiento. Dicho incremento fue en función del genotipo utilizado. El contenido de nitrógeno y proteína del grano fue más alto en el genotipo HS-2 con una aplicación de 160 kg N ha⁻¹. El mayor ingreso neto se logró con Promesa con 80 kg N ha⁻¹.

- Para Montecillo, Estado de México, el uso del maíz híbrido Promesa con una fertilización entre 80 y 160 kg ha⁻¹ de nitrógeno es una buena opción para productores que siembran en temporal, debido a que alcanzar un rendimiento de 3.8 Mg ha⁻¹, esto se pudiera incrementar con la asociación de riegos, por ser este híbrido eficiente en el uso del agua y nitrógeno, probablemente el rendimiento aumentaría.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México que mediante CONACYT se otorgó el apoyo económico para llevar a cabo este trabajo de investigación.

LITERATURA CITADA

- Agama-Acevedo, E., Y. Salinas-Moreno, G. Pacheco-Vargas y L. A. Bello-Pérez. 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: Morfología del almidón. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 317-329.
- Antuna, O., F. Rincón, E. Gutiérrez, N. A. Ruíz y L. Bustamante. 2003. Componentes genéticos de características agronómicas y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 11-17.
- Andrade, F., L. Echarte, R. Rizzalli, A. Della Maggiora, and M. Casanovas. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42: 1173-1179.
- Álvarez, R., H. S. Steinbach, C. R. Álvarez y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18: 14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Arrieche, L. E. y M. Ruiz D. 2010. Influencia de la fertilización química y orgánica sobre el carbono de la biomasa microbiana y rendimiento del maíz en suelos de pH contrastantes. *Agrociencias* 44: 249-260.
- Barbieri, P., H. E. Echeverría y H. R. Sainz Rozas. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Cien. Suelo* 21: 18-23.
- Benítez C., C. G. y H. Pfeiffer P. 2006. El maíz: Origen, composición química y morfología. *Mat. Avanz.* 7: 15-20.

- Borrás, L. and M. E. Otegui. 2001. Maize kernel weight response to post flowering source-sink ratio. *Crop Sci.* 49: 1816-1822.
- Caviglia, O. P. and V. O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69: 259-266.
- Chapman, H. D. y P. F. Pratt. 1979. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Trillas. México.
- Cruz-Flores, G., D. Flores R., G. Alcántar G., A. Trinidad S. y R. Vivanco E. 2002. Eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en genotipos de trigo, triticale y maíz. *Terra* 20: 411-422.
- D'Andrea, K. E., M. E. Otegui, and A. G. Cirilo. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105: 228-239.
- De la Cruz-Lázaro, E., H. Códova-Orellana, M. A. Estrada-Botello, J. D. Mendoza-Palacios, A. Gómez-Vázquez y N. P. Brito-Manzano. 2009. Rendimiento de grano de genotipos de maíz sembrados bajo tres densidades de población. *Univ. Cienc. Tróp. Húm.* 25: 93-98.
- 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.
- Domínguez, G. F., G. A. Studdert y H. E. Echeverría. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Cienc. Suelo* 19: 47-56.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. FAO. Serie Riego y Drenaje. Manual. Tomo 24.
- Escalante, E. J. A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. *Agroproductividad* 12: 28-32.
- Espinosa C., A., M. Sierra M. y N. Gómez M. 2003. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agron. Mesoamer.* 14: 117-121.
- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88: 97-185.
- Faraldo, M. L., G. T. Vergara, G. A. Casagrande, J. P. Arnaiz, H. Mirasson y C. Ferrero. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la Pampa, Argentina. *Agron. Trop.* 61: 47-57.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, D. F.
- García P., A. D. y C. López C. 2002. Temperatura base y tasa de expansión foliar del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25: 381-386.
- Hernández, A., V. Barrientos, A. Chassaigne y J. Alezones. 2003. Evaluación y selección de poblaciones y líneas de maíz (*Zea mays* L.) eficientes en la asimilación de nitrógeno. *Biagro* 15: 115-120.
- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93: 281-289.
- Khaliq, T., A. Ahmad, A. Hussain, and M. A. Ali. 2009. Maize hybrids response to nitrogen rates at multiple locations in semiarid environment. *Pak. J. Biol.* 41: 207-224.
- López, S., E. Guevara, M. Maturano, M. Melaj, J. P. Bonetto, S. Meira, O. Martin y N. Bárbaro. 2001. Absorción de nitrógeno en trigo en relación con la disponibilidad hídrica. *Terra*. 20: 7-15.
- López P., P., F. Prieto G., M. Gaytán M. y A. D. Román G. 2007. Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la Región Centro de México. *Rev. Chil. Nutr.* 34: 71-77.
- Mamani-Pati, F., D. E. Clay, C. G. Carlson, S. A. Clay, G. Reicks, and K. Kim. 2010. Nitrogen rate, landscape position and harvesting of corn stover impacts on energy gains and sustainability of corn production systems in South Dakota. *Agron. J.* 102: 1535-1541.
- Martínez-Rueda, C. G., G. Estrada-Campuzano, V. V. Beltrán-Guzmán, G. Ortega-Rojas y A. Contreras-Rendón. 2010. Contenido de agua en el grano y capacidad potencial de demanda en híbridos de maíz para Valles Altos. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 95-100.
- Mendoza E., M., E. Andrio Enríquez, J. M. Juárez Goiz, C. Mosqueda Villagómez, L. Latournerie Moreno, G. Castañón Nájera, A. López Benítez y E. Moreno Martínez. 2006. Contenido de lisina y triptófano en genotipos de maíz de alta calidad proteica y normal. *Univ. Cienc.* 22: 153-161.
- Morales R., E. J. y J. A. Escalante E. 2007. Eficiencia en el uso de los insumos agrícolas en la producción de biomasa y el rendimiento del sistema combinado girasol-frijol en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 25: 373-381.
- O'Neil, P. M., J. F. Shanahan, J. S. Schepers, and B. Caldwell. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate levels of water and nitrogen. *Agron. J.* 96: 1660-1667.
- Parker, R. 2000. La ciencia de las plantas. Paraninfo. Madrid, España.
- Pecina M., J. A., M. C. Mendoza-Castillo, J. A. López-Santillán, F. Castillo-González, M. Mendoza-Rodríguez y J. Ortiz-Cereceres. 2011. Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Rev. Fitotec. Mex.* 34: 85-92.
- Rasheed, M. and T. Mahmood. 2004. Effect of different planting methods and nutrient management on quality traits of hybrid maize. *Int. J. Agric. Biol.* 6: 162-164.
- Rasheed, M., W. M. Bhutta, M. Anwar-ul-Haq, and A. Ghaffar. 2004. Genotypic response of maize hybrids to NP applications. *Int. J. Agric. Biol.* 6: 721-722.
- Reynoso Q., C. A., A. González H., D. de J. Pérez L., O. Franco M., J. L. Torres F., G. A. Velázquez C., C. Breton L., A. Balbuena M. y O. Mercado V. 2014. Análisis de 17 híbridos de maíz sembrados en 17 ambientes de los Valles Altos del centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 871-882.
- Ritchie, S. W. and J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Special report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, IA, USA.
- Rivetti, A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. Fac. Cienc. Agr.* 38: 25-36.
- Shapiro, C. A. and C. S. Wortmann. 2006. Corn response to nitrogen rate, row spacing and plant density in Eastern Nebraska. *Agron. J.* 98: 529-535.
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria). 2011. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SAGARPA. México. Disponible en: 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.
- Stagnari, F., V. Di Bitetto, and M. Pisante. 2007. Effects of N fertilizers and rates on yield, safety and nutrients in processing spinach genotypes. *Sci. Hortic.* 114: 225-233.

- Turrent-Fernández, A., R. Camas-Gómez, A. López-Luna, M. Cantú-Almaguer, J. Ramírez-Silva, J. Medina-Méndez y A. Palafox-Caballero. 2004. Producción de maíz bajo riesgo en el Sur-Sureste de México: II. Desempeño financiero y primera aproximación tecnológica. *Agric. Téc. Méx.* 30: 205-221.
- Volke, H. V. 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Colegio de Postgraduados. México, D. F., México.
- Yu-kui, R., J. Shi-ling, Z. Fu-suo, and S. Jian-bo. 2009. Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Agrociencia* 43: 21-27.
- Zepeda, B., R., A. Carballo C., A. Muñoz O., J. A. Mejía C., B. Figueroa S. y F. V. González C. 2007. Fertilización nitrogenada y características físicas, estructurales y calidad del nixtamal-tortilla del grano de híbridos de maíz. *Agric. Téc. Méx.* 33: 17-24.
- Zepeda B., R., A. Carballo C., A. Muñoz O., J. A. Mejía C., B. Figueroa S., F. V. González C. y C. Hernández A. 2009. Proteína, triptófano y componentes estructurales del grano en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) producidos bajo fertirrigación. *Agrociencia* 43: 143-152.