

CONTENIDO DE AGUA EN EL GRANO Y CAPACIDAD POTENCIAL DE DEMANDA EN HÍBRIDOS DE MAÍZ PARA VALLES ALTOS

KERNEL WATER CONTENT AND POTENTIAL SINK CAPACITY IN HIGHLAND MAIZE HYBRIDS

Carlos G. Martínez-Rueda*, Gaspar Estrada-Campuzano, Vania V. Beltrán-Guzmán, Guadalupe Ortega-Rojas y Alejandra Contreras-Rendón

Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo". 05020, Toluca, México. Tel. (fax): (722) 296-55-18.

* Autor para correspondencia (cgmartinezr@uaemex.mx)

RESUMEN

En maíz (*Zea mays* L.) la capacidad potencial de demanda (CPD) a nivel de cultivo puede estimarse con el producto entre el número de granos por unidad de superficie (NG) y el contenido máximo de agua en el grano (CMAG). La CPD también se puede utilizar para estudiar el papel de algunos factores de crecimiento sobre el rendimiento de grano en función de cambios en el NG y en el peso individual de grano (PG). En el presente estudio se midió el contenido de agua en el grano y la CPD en tres híbridos comerciales de Valles Altos ('Cónдор', 'H-48' y 'H-50') en función de dos fechas de siembra (normal: 11/04/08, y tardía: 29/04/08), dos dosis de fertilización nitrogenada (30 y 180 kg N ha⁻¹) y dos densidades de población (6.25 y 9.25 plantas m⁻²), durante el ciclo Primavera-Verano 2008 en el valle de Toluca, México. En los tres híbridos aumentó el NG al incrementar la dosis de N y la densidad de población, en las dos fechas de siembra. La variación en el NG fue de ca. 1500 a 2500 granos m⁻², lo que refleja una amplia variación en las condiciones de crecimiento que hubo durante la floración y el periodo de llenado de grano. La duración del periodo de llenado de grano no se afectó sensiblemente al retrasar la FS o aumentar la dosis de N; sin embargo, la mayor dosis de N incrementó ($P \leq 0.05$) la tasa de llenado de grano, así como el CMAG y el PG. El rendimiento de grano de los tres híbridos estuvo estrechamente asociado con la CPD. Estos resultados resaltan la importancia del papel determinístico de un alto valor de la CPD para incrementar el potencial de rendimiento de grano en los híbridos de maíz de Valles Altos de México.

Palabras clave: *Zea mays*, rendimiento de grano, número de granos, peso de grano, tasa de llenado de grano, periodo de llenado de grano.

SUMMARY

In maize (*Zea mays* L.) potential sink capacity (PSC) at crop level can be estimated as the product of kernel number per unit area (KN) and maximum kernel water content (MKWC). PSC can be used to study the role of some growth factors on grain yield in response to changes in KN and individual kernel weight (KW). In this study we measured kernel water content and PSC in three commercial highland maize hybrids ('Condor', 'H-48' and 'H-50') in two sowing dates (normal: 11/04/08, and late: 29/04/08), two nitrogen rates (30 and 180 kg ha⁻¹) and two population densities (6.25 and 9.25 plants m⁻²), during the Spring-Summer season of 2008 in Toluca Valley, México. All maize hybrids showed an increase in KN when N concentration and population density were increased in the two sowing dates. KN varied from 1500 to 2500 grains m⁻² thus reflecting the wide variation in growing conditions occurring during flowering and grain filling periods. The duration of the grain filling period was not affected by delaying the sowing date or decreasing the concentration of N; however, the highest N concentration induced a gain ($P < 0.05$) in grain filling rate, which reflected in higher values of MKWC and KW. Grain yield of these hybrids was strongly associated with PSC established during the flowering period and start of the grain filling period. These results highlight the importance of the deterministic role of a high PSC value to increase grain yield potential of Mexican highlands maize hybrids.

Index words: *Zea mays*, grain yield, grain number, grain weight, grain filling rate, grain filling period.

INTRODUCCIÓN

En maíz (*Zea mays* L.) el número de granos cosechados por unidad de superficie (NG) y el peso individual de grano (PG) son los componentes numéricos que determinan el rendimiento. Para estudiar los efectos del ambiente y las prácticas de manejo sobre el rendimiento potencial que pueden alcanzar los cultivares de maíz, usualmente se generan modelos mecanísticos en donde se ensayan distintas modalidades o intensidades de los principales factores que regulan el crecimiento y desarrollo del cultivo, al variar la fecha de siembra (Cirilo *et al.*, 1994; Otegui *et al.*, 1995), la densidad de población o el arreglo espacial de las plantas (Barbieri *et al.*, 2000), la disponibilidad de nitrógeno (Bazinger *et al.*, 2002; D'Andrea *et al.*, 2008), o al variar simultáneamente dos o más de estos factores (Sala *et al.*, 2007; Melchiori y Caviglia, 2008). Tales tratamientos inducen cambios en las relaciones fuente-demanda, cuyos efectos sobre los procesos fisiológicos que determinan el NG y el PG se pueden cuantificar.

De los dos principales componentes del rendimiento, el NG es el más sensible a las variaciones ambientales y a la disponibilidad de recursos que regulan el crecimiento (e.g., radiación y temperatura, agua y nutrientes en el suelo), mientras que el PG es más estable y depende fundamentalmente de la tasa de llenado en el periodo

postfloración (Andrade *et al.*, 1999; Borrás y Otegui 2001; Lee y Tollenaar, 2007). El crecimiento del grano se describe usualmente en términos de la acumulación de materia seca, y puede dividirse en tres fases luego de la floración femenina. Durante la primera fase, denominada "lag" o lenta, se presenta una alta tasa de división de células endospermáticas y la acumulación de materia seca es prácticamente nula en relación al peso final del grano; la segunda fase denominada periodo de llenado efectivo del grano, muestra acumulación de materia seca a tasa constante; en la última fase la tasa de acumulación decrece hasta que se determina el peso final del grano (Egli, 1998). La tasa de llenado (*i.e.*, cantidad de materia seca acumulada por unidad de tiempo) durante el periodo de llenado efectivo, junto con la duración de esa fase, representan los más importantes descriptores del proceso de llenado de granos (Melchiori y Caviglia, 2008).

Para lograr un mayor entendimiento de los mecanismos ecofisiológicos que determinan el rendimiento de grano de los híbridos de maíz en función de las prácticas de manejo, se hizo el presente trabajo cuyo objetivo principal fue estudiar el efecto de la fecha de siembra, la dosis de fertilización nitrogenada y la densidad de población, sobre el contenido de agua en el grano y la capacidad potencial de demanda en tres híbridos comerciales de maíz de los Valles Altos centrales de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento y manejo experimental

Este trabajo se llevó a cabo en condiciones de campo experimental en Toluca, México (19° 17' LN, 99° 39' LO, 2640 mnsnm) durante el ciclo Primavera-Verano del 2008. Se establecieron cuatro experimentos surgidos de las combinaciones de dos fechas de siembra (normal: 11/04/09, y tardía: 29/04/09) y dos dosis de N (30 y 180 kg ha⁻¹). En cada fecha de siembra se establecieron dos experimentos, uno con baja dosis de N (30 kg ha⁻¹) y otro con dosis alta (180 kg ha⁻¹). En cada experimento se evaluaron tres híbridos comerciales de maíz ('Cóndor', 'H-40' y 'H-48') bajo dos densidades de población (6.25 y 9.25 plantas m⁻²) en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones; la densidad de población se asignó a las parcelas grandes, y los híbridos a las parcelas chicas; estas últimas estuvieron conformadas por cuatro surcos de 6 m de longitud separados a 80 cm. La fertilización se hizo al momento de la siembra con el tratamiento 30N-60P-30K para los tratamientos de baja fertilización nitrogenada, y con 180N-60P-30K para los tratamientos de alta fertilización N; en este último se aplicaron 60 unidades de N y la totalidad de P y K al momento de la siembra, y las 120 unidades de N restantes se aplicaron en

dos partes: 60 unidades cuando las plantas tenían seis hojas expandidas y 60 unidades cuando tenían doce hojas expandidas. Como fuentes de N, P y K se utilizó urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente. Durante el ciclo de crecimiento se mantuvieron los experimentos libres de maleza y plagas, mediante la aplicación de los herbicidas e insecticidas para la región (ICAMEX, 2000).

Variables medidas

La cinética del peso de grano se registró periódicamente (cada 5 a 7 d) en mazorcas de plantas previamente etiquetadas, con registro del día en que inició la floración femenina. El periodo de muestreo se inició 15 d después de la floración. Se pesaron 10 granos tomados de las posiciones 10 a 15 contadas a partir de la parte basal de cada mazorca, inmediatamente después de haber sido extraídos, y en seguida se secaron en una estufa con aire forzado a 80 °C durante 48 h, para luego registrar su peso seco. El contenido de agua por grano (CAG) se calculó como la diferencia entre el peso fresco (PFG) y el peso seco de grano (PSG).

Para estimar la tasa de crecimiento del grano se utilizó el procedimiento descrito por Gambín *et al.* (2007), el cual emplea un modelo bilineal con fase estacionaria en el que se relaciona el PSG con el tiempo térmico (TT) acumulado en °C d⁻¹, desde el inicio de la floración (R_i) hasta el día de cada muestreo, con una temperatura base de 0 °C. Con este modelo se obtuvo la tasa de crecimiento de grano (TCG) como la pendiente de regresión del modelo bilineal, y se expresó en mg g⁻¹, °C d⁻¹, mientras que el periodo de llenado efectivo se cuantificó con los °C d⁻¹ transcurridos después de la fase "lag" hasta que se obtuvo el peso máximo de grano (*i.e.*, cuando se alcanzó la fase estacionaria).

El contenido máximo de agua en el grano (CMAG) se estimó con un modelo trilineal que relaciona el TT acumulado en cada muestreo con el CAG (Gambín *et al.*, 2007). La capacidad potencial de demanda (CPD) se calculó al multiplicar el NG por el CMAG, y se expresó en g m⁻² (Melchiori y Caviglia, 2008). El rendimiento de grano se midió en las plantas cosechadas en los 5 m interiores de los dos surcos centrales (8 m²) y su contenido de humedad se ajustó a 14 % (p/p). El peso final de grano (PG) ajustado a 14 % de humedad y el número de granos por m² (NG) se estimaron a partir de los granos producidos en una muestra de 10 plantas con competencia completa, tomadas al azar en cada parcela experimental útil.

Análisis estadísticos

Con los datos obtenidos de los cuatro experimentos se realizaron los análisis de varianza combinados mediante los procedimientos descritos por Gomez y Gomez (1976) para análisis de experimentos de parcelas divididas en serie. Los cálculos numéricos de dichos análisis se efectuaron con el programa estadístico SAS® (SAS Institute, 2000). La tasa de crecimiento y contenido de agua en el grano se estimaron con modelos de regresión empíricos del programa Table Curve® (Jandel Scientific, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estructura de tratamientos aquí utilizada fue diseñada para explorar un amplio espectro de variación ambiental

inducida por manejo agronómico, sobre la determinación del rendimiento de grano (RG) en tres híbridos de maíz de los Valles Altos de México con lo que se buscó inducir cambios sustanciales en la CPD mediante alteraciones en NG y en su contenido máximo de agua (CMAG). Los resultados de los análisis de varianza combinados indicaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) en la mayoría de los factores de estudio, pero de interacciones sólo hubo efectos significativos para la interacción F x N en la tasa de crecimiento del grano (TCG) ($P \leq 0.01$) y en RG ($P \leq 0.05$) (Cuadros 1 y 3). El RG mostró respuesta significativa ($P \leq 0.05$) a la dosis de N y a la densidad de población, atribuible a un incremento en NG, TCG, CMAG y el peso del grano (PG) (Cuadros 2 y 4).

Cuadro 1. Significancia estadística de los valores de F de tres componentes del crecimiento de grano y el peso máximo de grano en tres híbridos comerciales de maíz evaluados bajo distintas condiciones de manejo agronómico en el Valle de Toluca, México, 2008.

Fuente de variación	Tasa de crecimiento de grano (mg °C d ⁻¹)	Duración del periodo de llenado de grano (°C d ⁻¹)	Contenido máximo de agua en el grano (mg/grano)	Peso máximo de grano (mg/grano)
Fecha de siembra (F)	**	ns	ns	ns
Dosis de nitrógeno (N)	**	ns	**	**
F x N	**	ns	ns	ns
Densidad de población (D)	ns	ns	ns	**
F x D	ns	*	ns	ns
N x D	ns	ns	ns	ns
F x N x D	ns	*	ns	ns
Híbridos (H)	**	ns	**	ns
F x H	ns	ns	ns	ns
N x H	ns	ns	ns	ns
D x G	ns	ns	ns	ns
F x N x H	ns	ns	ns	ns
F x D x H	ns	ns	ns	ns
N x D x H	ns	ns	ns	ns
F x N x D x H	ns	ns	ns	ns

ns, *, ** no significativo, significativo a 0.05 y 0.01, respectivamente.

Cuadro 2. Efecto de fecha de siembra, dosis de nitrógeno, densidad de población y genotipo sobre tres componentes del crecimiento de grano y peso máximo de grano en tres híbridos comerciales de maíz evaluados en Toluca, México 2008.

Factores y niveles	Tasa de crecimiento de grano (mg °C d ⁻¹)	Duración del periodo de llenado de grano (°C d ⁻¹)	Contenido máximo de agua en el grano (mg/grano)	Peso máximo de grano (mg/grano)
Fecha de siembra				
Normal (11/04/08)	0.330 ± 0.008 [†]	951 ± 20	208 ± 5	297 ± 6.4
Tardía (01/05/08)	0.362 ± 0.008	934 ± 22	217 ± 4	316 ± 7.2
Dosis de nitrógeno				
30 kg ha ⁻¹	0.333 ± 0.009	918 ± 23	201 ± 5	288 ± 6.6
180 kg ha ⁻¹	0.359 ± 0.007	967 ± 17	225 ± 4	324 ± 6.0
Densidad de población				
6.25 plantas m ⁻²	0.354 ± 0.008	945 ± 19	218 ± 4	316 ± 6.5
9.25 plantas m ⁻²	0.338 ± 0.008	940 ± 22	208 ± 6	297 ± 7.1
Híbrido				
‘Cándor’	0.323 ± 0.008	956 ± 29	196 ± 6	296 ± 6.9
‘H48’	0.371 ± 0.008	898 ± 21	233 ± 6	309 ± 7.5
‘H50’	0.344 ± 0.007	974 ± 24	210 ± 4	314 ± 6.3

[†] Valores medios ± error estándar.

Cuadro 3. Significancia estadística de los valores de F de tres componentes del crecimiento de grano y el peso máximo de grano en tres híbridos comerciales de maíz evaluados bajo distintas condiciones de manejo agronómico en el Valle de Toluca, México, 2008.

Fuente de variación	Número de granos por m ²	Capacidad potencial de demanda (g m ⁻²)	Rendimiento de grano (g m ⁻²)
Fecha de siembra (F)	**	*	*
Dosis de nitrógeno (N)	**	**	**
F x N	ns	ns	*
Densidad de población (D)	**	*	ns
F x D	ns	ns	ns
N x D	ns	ns	ns
F x N x D	ns	ns	ns
Híbridos (H)	**	ns	**
F x H	ns	ns	ns
N x H	ns	ns	ns
D x G	ns	ns	ns
F x N x H	ns	ns	ns
F x D x H	ns	ns	ns
N x D x H	ns	ns	ns
F x N x D x H	ns	ns	ns

ns, *, ** no significativo, significativo a $P \leq 0.10$, 0.05 y 0.01 , respectivamente.

Cuadro 4. Efecto de fecha de siembra, dosis de nitrógeno, densidad de población y genotipo sobre número de granos por m², capacidad potencial de demanda y rendimiento de grano en Toluca, México, 2008.

Factores y niveles	Número de granos por m ²	Capacidad potencial de demanda (g m ⁻²)	Rendimiento de grano (g m ⁻²)
Fecha de siembra			
Normal (11/04/08)	2150 ± 84 [†]	450 ± 22	750 ± 32
Tardía (01/05/08)	1670 ± 64	359 ± 17	600 ± 24
Dosis de N			
30 kg ha ⁻¹	1676 ± 80	334 ± 16	555 ± 25
180 kg ha ⁻¹	2143 ± 71	482 ± 18	794 ± 21
Densidad de población			
6.25 pl m ⁻²	1761 ± 73	385 ± 18	645 ± 29
9.25 pl m ⁻²	2059 ± 89	482 ± 24	705 ± 31
Híbrido			
‘Cóndor’	2033 ± 82	391 ± 19	698 ± 34
‘H48’	1798 ± 84	423 ± 31	632 ± 39
‘H50’	1899 ± 86	404 ± 27	693 ± 40

[†] Valores medios ± error estándar.

Los híbridos mostraron variación significativa ($P \leq 0.05$) en TCG, CMAG, NG y RG, donde ‘Cóndor’ destacó por presentar un mayor NG promedio, aunque este efecto se vio compensado con un menor PMG debido a una menor TCG; en cambio los híbridos ‘H-48’ y ‘H-50’ presentaron mayor PG, asociado con una mayor TCG (Cuadros 2 y 4).

A nivel de cultivo, la respuesta del maíz a la dosis de N se ha relacionado con un incremento en la intercepción y eficiencia en el uso de la radiación (Barbieri *et al.*, 2000), incremento que se puede ver reflejado en una mayor tasa de crecimiento de las plantas durante el periodo cercano a floración y mayor disponibilidad de asimilados para la formación de granos (Andrade *et al.*, 1999; D’Andrea *et al.*, 2008). Aunque en el presente trabajo no se dispone de datos sobre la intercepción de la radiación y producción de biomasa, se puede inferir que los incre-

mentos observados en el NG, de ca. 1500 a 2500 granos m⁻² (Figuras 1A y 2A), reflejan una amplia variación en las condiciones de crecimiento que se presentaron durante la floración y el periodo de llenado de grano. La duración del periodo de llenado de grano no se afectó al retrasar la FS o al aumentar la dosis de N; sin embargo, la mayor dosis de N incrementó ($P \leq 0.05$) la TCG, lo cual se manifestó en un mayor CMAG y PG (Cuadro 1).

Las relaciones entre los órganos proveedores y los órganos demandantes que ocurren alrededor de la etapa de floración parecen ser críticas para la fijación del número de granos (Sala *et al.*, 2007), y también establecen el potencial de demanda a nivel de grano (Gambin *et al.*, 2007). De hecho, el peso final de grano se ha relacionado más con la tasa de crecimiento cercana a la floración que durante el periodo de llenado (Gambin *et al.*, 2007). Lo anterior, así como los resultados obtenidos previamente

por Borrás y Otegui (2001), sugieren que la capacidad de demanda a nivel de grano está determinada durante el periodo “crítico” que ocurre 15 d antes y 15 d después de la floración, y que el incremento en peso que alcanza el grano en la etapa final del llenado se define por la asignación de asimilados en función del número de granos formados en dicho periodo. Por tanto, si se mejoran las

condiciones ambientales del maíz durante el periodo crítico se esperaría un mayor NG. Los resultados del presente trabajo muestran que al atrasar la fecha de siembra e incrementar la dosis de N, los tres híbridos de maíz aquí evaluados alcanzan mayor contenido de agua en el grano y mayor peso de grano (Cuadro 1).

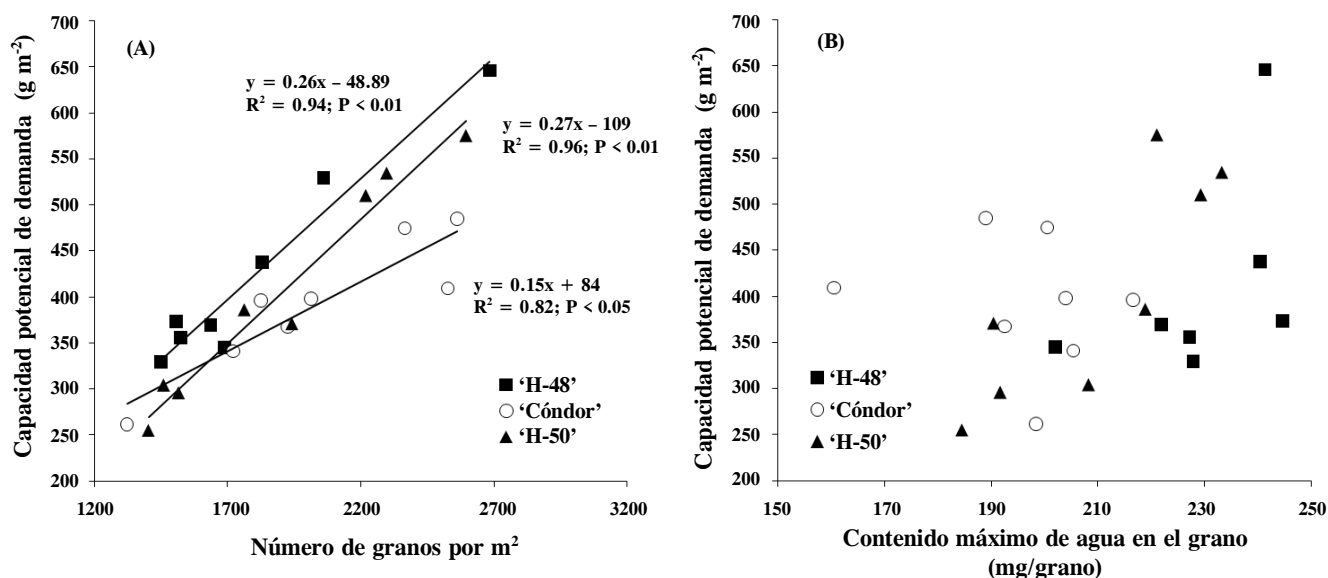


Figura 1. Relación entre la capacidad potencial de demanda con el número de granos por m² (A) y el contenido máximo de agua en el grano (B). Los puntos representan a la respuesta de cada híbrido a través de los ocho ambientes de evaluación (n = 3).

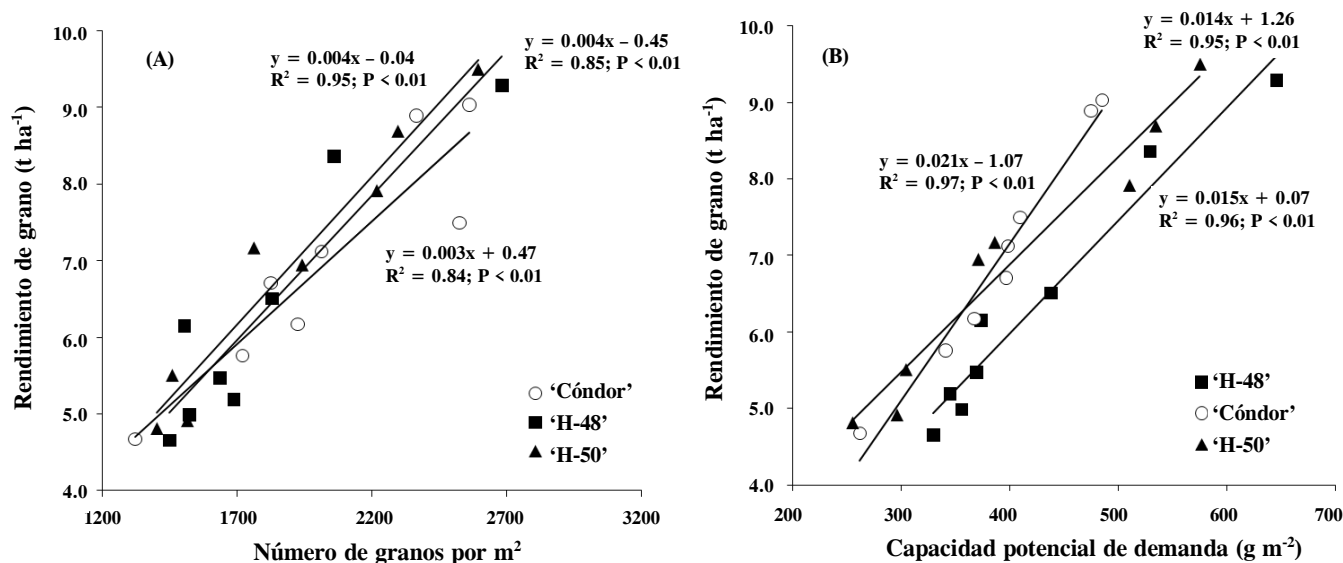


Figura 2. Relación entre el rendimiento de grano con el número de granos por m² (A) y la capacidad potencial de demanda (B). Los puntos representan a la respuesta de cada híbrido a través de los ocho ambientes de evaluación (n = 3).

La demanda potencial de fotoasimilados a nivel de cultivo depende en gran medida del número de estructuras reproductivas más que del tamaño de las mismas a nivel individual; sin embargo, existen pocas evidencias en donde se haya cuantificado esta relación. Los resultados aquí obtenidos indican claramente que la capacidad de demanda (CPD) depende grandemente del NG (Figura 1A), y en menor medida del contenido máximo de agua en el grano (Figura 1B). En forma conjunta, NG y CMAG explicaron en 95 a 97 % las variaciones observadas en el RG de los tres híbridos aquí evaluados (Figura 1B). Esto coincide con los resultados obtenidos por Melchiori y Caviglia (2008), quienes concluyeron que los cambios en la capacidad de demanda por efecto de fechas de siembra tardías y deficiencias de N estuvieron más relacionados con variaciones del NG que con las del CMAG. Se resalta así la importancia del papel determinístico del establecimiento temprano de la capacidad de demanda sobre el rendimiento de grano durante su crecimiento.

CONCLUSIONES

En híbridos de maíz de los Valles Altos centrales de México, los cambios en fecha de siembra, disponibilidad de N y densidad de población inducen variaciones significativas en el número y el peso individual de los granos. Al aumentar la disponibilidad de N se incrementan significativamente la tasa de crecimiento, el contenido máximo de agua y el peso final de los granos. Cuando se incrementa la capacidad potencial de demanda durante el periodo de llenado de grano, se alcanza mayor potencial de rendimiento de estos híbridos. Los cambios en la capacidad potencial de demanda están mayormente asociados con el número de granos y con el contenido máximo de agua que alcanzan los granos durante su crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de México por el financiamiento otorgado a través del proyecto 2721/2008U.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade F H, C Vega, S Uhart, A Cirilo, M Cantarero, O Valentinuz (1999) Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39:453-459.
- Barbieri P A, H Sainz, F H Andrade, H E Echeverría (2000) Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. *Agron. J.* 92:283-288.
- Bazinger M, G O Edmeades, H R Lafitte (2002) Physiological mechanism contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Res.* 75:223-233.
- Borrás L, M E Otegui (2001) Maize kernel weight response to post flowering: Source-sink ratio. *Crop Sci.* 49:1816-1822.
- Cirilo A G, F H Andrade (1994) Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34:1039-1043.
- D'Andrea K E, M E Otegui, A G Cirilo (2008) Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105:228-239.
- Egli D B (1998) Seed Biology and the Yield of Grain Crops. CAB International, Wallingford, U.K. 184 p.
- Gambin B L, L Borrás, M E Otegui (2007) Kernel water relations and duration of grain filling in maize temperate hybrids. *Field Crops Res.* 101:1-9.
- Gomez K A, A A Gomez (1976) Statistical Procedures for Agricultural Research. 2nd ed. John Wiley and Sons. New York. pp:316-355.
- ICAMEX Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (2000) Guía para la Producción de Maíz en Valles Altos del Estado de México, Gobierno del Estado de México, México. 9 p.
- Jandel Scientific (1991) Table Curve V. 3.1. User's Manual version 3.0 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera. CA, USA
- Jandel Scientific (1991) Table Curve V. 3.1. User's Manual version 3.0 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera. CA, USA.
- Lee E A, M Tollenaar (2007) Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Sci.* 47(Suppl. 3): S202-S215.
- Melchiori R J M, O P Caviglia (2008) Maize kernel growth and kernel relations as affected by nitrogen supply. *Field Crops Res.* 108:198-205.
- Otegui M E, M G Nicolini, R A, Ruiz, P A Dodds (1995) Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87:29-33.
- Sala R G, F H Andrade, M E Westgate (2007) Maize kernel moisture at physiological maturity as affected by source-sink relationship during grain filling. *Crop Sci.* 47:709-714.
- SAS Institute (2000) Statistical Analysis System Version 8, Cary, NC: SAS Institute Inc.