

Importancia de la interacción nitrógeno-densidad en la dosificación de N

Cecilia Cerliani^{1,*}, Rafael Naville¹, Guillermo Balboa², Alejo Ruiz³, Gabriel Martínez Bologna¹, Nicolás Bossio¹, y Gabriel Espósito¹

¹Universidad Nacional de Río Cuarto, ²Kansas State University, ³Chacra AAPRESID Justiniano Posse

*Contacto: ccerliani@ayv.unrc.edu.ar

Introducción

La densidad de siembra en el cultivo de maíz es una de las prácticas de manejo que más impactan sobre su rendimiento (Andrade et al., 1996). Varios autores han demostrado que la relación entre la productividad de maíz y la densidad de plantas es de tipo óptimo (Karlem y Camp, 1985; Sangoi et al., 2002; Capristo et al., 2007; Sarlengue et al., 2007), dependiendo la magnitud de esta respuesta de la oferta de recursos ambientales (Horbe et al., 2013). Esto es debido a la relación curvilínea existente entre la tasa de crecimiento individual durante el periodo crítico del maíz y el número de granos por plantas, que es el principal componente del rendimiento. Como consecuencia de esta relación, cuando la tasa de crecimiento es baja la producción de granos es baja e incluso puede ser nula si esta tasa se encuentra por debajo del umbral para la producción de granos; a medida que aumenta la tasa de crecimiento la producción de granos aumenta hasta alcanzar un valor máximo, en el cual por más que se siga incrementando el crecimiento de cada planta la producción individual de granos no aumentará debido a limitaciones morfo genéticas de la espiga de maíz. La tasa de crecimiento por planta varía en función de la disponibilidad de recursos, como por ejemplo radiación, agua y nutrientes (Andrade et al., 1999).

Dentro de los nutrientes, la variabilidad de la oferta de nitrógeno (N) está ampliamente citada en los suelos de la región pampeana (Espósito et al., 2014). Se ha estudiado exhaustivamente la importancia del N para el cultivo de maíz y que su aplicación mediante fertilización química genera mejoras en la producción debido a que frecuentemente los cultivos presentan deficiencias de este nutriente como consecuencia de los altos requerimientos por parte del cultivo y/o por la escasa oferta por parte del suelo. Además, se han desarrollado diferentes métodos de diagnóstico

que permiten determinar la dosis recomendada de fertilización nitrogenada N (Echeverría et al., 2014). Sin embargo, hasta la actualidad no hay modelos de dosificación que sean sensibles a cambios en la densidad de siembra del maíz.

Teniendo en cuenta que la densidad óptima depende de los recursos ambientales, cómo el N, se puede suponer que la dosis óptima de N (DON) interaccionaría con la densidad de plantas, por lo tanto los objetivos de este trabajo fueron: I evaluar la interacción entre la densidad de siembra de maíz y la dosis de nitrógeno empleada; II optimizar simultáneamente la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno; III determinar la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos; y IV determinar la Eficiencia Agronómica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

Materiales y Métodos

Se llevaron a cabo una serie de ensayos en la zona Sur de Córdoba: el Experimento I se realizó durante la campaña 2005/06; el Experimento II durante la campaña 2008/09; los Experimentos III, IV, y V en la 2015/16; y los Experimentos VI y VII durante la campaña 2016/17. Todos los experimentos se sembraron sobre antecesor soja, en un sistema de labranza de siembra directa con un distanciamiento entre hileras de 0.52 m. Los ensayos se mantuvieron libre de malezas, plagas y enfermedades.

El diseño estadístico para todos los casos fue un arreglo factorial, donde el factor principal fue la dosis de N y el secundario la densidad de siembra, con 2 a 4 repeticiones según el ensayo.

En la **Tabla 1** se presentan los distintos ensayos con la ubicación, fecha de siembra, dosis de N aplicadas y densidades sembradas.

Tabla 1. Descripción de los ensayos evaluados.

Experi- mento	Sitio	Fecha de Siembra	Hibrido	Dosis de N, kg ha ⁻¹	Densidad de siembra, miles de semillas ha ⁻¹
I	Río Cuarto	2/11/2005	AX882 y DK682	80-168 y 252	80 y 95
II	Río Cuarto	3/10/2008	DK 747MGRR2, DK 190 MGRR2 y AX 882 MGHCL	0 y 160	75 y 95
III	Bell Ville	7/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 120, 240 y 360	45, 60, 70 y 80
IV	Justiniano Posee	7/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 67, 117 y 167	54, 91, 107 y 134
V	Justiniano Posee	10/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 76, 126 y 178	51, 80, 104 y 135
VI	Ucacha	16/09/2016	DK 7210 VT3P	0, 74, 84 y 213	30, 60, 90 y 120
VII	Alejandro Roca	26/09/2016	AX 7822 TD/TG	0, 100, 200 y 300	40, 70, 100 y 130

Evaluación de la interacción entre densidad:dosis de nitrógeno.

La misma se realizó a través del análisis de los datos de los Experimentos mediante ANAVA, utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al, 2016).

Optimización simultanea de la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno

Con los datos de los Experimentos III, IV, V, VI y VII, se modelo la respuesta del maíz a la densidad y dosis de nitrógeno como un polinomio de segundo grado según la **Ec. 1**:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 D + \beta_3 N^2 + \beta_4 D^2 + \beta_5 ND + \varepsilon \quad \text{Ec.1}$$

donde Y es el rendimiento del maíz (kg ha⁻¹), $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de siembra (semillas ha⁻¹), N es la dosis de N (kg N ha⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

Los parámetros de la función fueron estimados mediante el software INFOSTAT (Di Rienzo et al, 2016).

La optimización se realizó derivando la función de producción dependiente de la dosis de N y de la densidad de siembra (**Ec. 2 y Ec. 5**), las que se igualaron a 0 y posteriormente se despejó N* y D* (**Ec. 4 y Ec. 5**), finalmente se substituyó el N en la función de la D* mediante el método de substitución según indica la **Ec. 6** y luego para obtener N* se substituyó D* (**Ec. 7**).

$$\Delta R \Delta N = \beta_1 + 2 \beta_3 N + \beta_5 D = 0 \quad \text{Ec.2}$$

$$\Delta R \Delta D = \beta_2 + 2 \beta_4 D + \beta_5 N = 0 \quad \text{Ec.3}$$

$$N^* = (-\beta_1 - \beta_5 D) / 2\beta_3 \quad \text{Ec.4}$$

$$D^* = (-\beta_2 - \beta_5 N) / 2\beta_4 \quad \text{Ec.5}$$

$$D^* = (-\beta_2 - \beta_5 ((-\beta_1 - \beta_5 D) / 2\beta_3)) / 2\beta_4 \quad \text{Ec.6}$$

$$N^* = (-\beta_1 - \beta_5 ((-\beta_2 - \beta_5 N) / 2\beta_4)) / 2\beta_3 \quad \text{Ec.7}$$

donde $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la Ec. 1, D* es la densidad de siembra óptima (semillas ha⁻¹), N* es la dosis de N óptima (kg N ha⁻¹).

Determinación la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos

Utilizando los datos del Experimento V, se modeló la respuesta del rendimiento al N disponible por planta, para cada densidad de siembra.

El nitrógeno por planta se determinó mediante la suma del N disponible a la sexta hoja totalmente desplegada del cultivo (según análisis de suelo hasta los 0.6 m de profundidad) y el cociente entre el N aplicado y la densidad de plantas.

Para ello se modelo como un polinomio de segundo grado según la **Ec. 8**:

$$R = \beta_0 + \beta_1 NPP + \beta_2 NPP^2 + \varepsilon \quad \text{Ec.8}$$

donde R es el rendimiento del maíz (kg ha⁻¹), β_0, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación de regresión, NPP es el N disponible por planta (g planta⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

La dosis óptima agronómica se obtuvo mediante la estimación de la primera derivada de la ecuación anterior igualada a cero. De este modo el valor de N disponible por planta es el necesario para alcanzar el máximo rendimiento por hectárea en cada densidad (**Ec. 9**).

$$\Delta R \Delta NPP = \beta_1 + 2 \beta_2 NPP \quad \text{Ec.9}$$

Donde $\Delta R\Delta NPP$, derivada del rendimiento en función de N disponible por planta, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación 8, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹).

Además, se modeló para cada densidad, la relación entre el N disponible por planta y la producción por planta, se ajustó una regresión cuadrática (**Ec. 10**) y a través de su primera derivada (**Ec. 11**) igualada a cero se obtuvo la máxima producción por planta.

$$RPP = \beta_0 + \beta_1 NPP + \beta_2 NPP^2 + \varepsilon \quad \text{Ec. 10}$$

donde RPP es el rendimiento por planta (g planta⁻¹), β_0 , β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación de regresión, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

$$\Delta R\Delta NPP = \beta_1 + 2 \beta_2 NPP \quad \text{Ec. 11}$$

Donde $\Delta RPP\Delta NPP$, derivada del rendimiento por planta en función de N disponible por planta, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación 8, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹).

En todas las ecuaciones los parámetros fueron obtenidos mediante el programa INFOSTAT.

Determinación de la Eficiencia Agronomica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

En el Experimento V, se determinó la Eficiencia Agronómica (EA) (de acuerdo a la **Ec. 12**), para distintos métodos de diagnóstico:

- 150 - X (Pagani et al., 2008)
- Balance (Meisinger, 1984)
- MEME (Espósito, 2013)
- Optimización Simultanea

Resultados y discusión

Interacción entre densidad:dosis de nitrógeno.

En todos los casos se observó un efecto interactivo entre la densidad de siembra y la dosis de N (**Tabla 2**).

Tabla 2. Rendimiento alcanzado en cada tratamiento de los experimentos evaluados y valor p de la interacción densidad de siembra:dosis de N.

Experi- mento	Densidad (miles semillas ha ⁻¹)	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimien- to (kg ha ⁻¹)		
I**	80	0	16 050		
		168	18 283		
		252	19 083		
	95	0	14 450		
		168	18 967		
		252	19 517		
II+	75	0	10 875		
		160	10 933		
		0	9012		
	95	160	10 885		
		0	5549		
		34	7527		
III**	45	68	8964		
		102	9226		
		0	6218		
		34	9930		
		60	68	10 973	
			102	10 892	
			0	6924	
			34	9144	
		70	68	10 498	
			102	10 425	
			0	5629	
			34	6970	
	80	68	9237		
		102	10 186		
		IV*	54	0	8903
				67	8472
117	8537				
167	8450				
	91	0	11 229		
		67	10 922		
		117	11 172		
		167	11 264		
	107	0	11 571		
		67	11 461		
		117	11 612		
		167	12 005		
	134	0	11 305		
		67	12 186		
		117	12 106		
		167	12 443		
V*	51	0	9864		
		76	11 362		

Experi- mento	Densidad (miles semillas ha ⁻¹)	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimien- to (kg ha ⁻¹)
		126	11 026
		178	11 068
	80	0	10 071
		76	11 627
		126	13 478
		178	13 053
	104	0	9728
		76	11 825
		126	13 385
		178	13 210
	135	0	9583
		76	11 564
		126	12 748
		178	13 511
VI**	40	0	7020
		74	7820
		84	7670
		213	7590
	60	0	7640
		74	9150
		84	9120
		213	9140
	75	0	7940
		74	10 000
		84	10 580
		213	10 320
	90	0	7940
		74	10 850
		84	10 676
		213	10 880
VII**	40	0	7370
		100	7430
		200	7110
		300	7620
	70	0	9340
		100	10 150
		200	10 210
		300	10 340
	100	0	8900
		100	10 110
		200	10 690
		300	10 430
	130	0	8820
		100	10 070
		200	10 660
		300	10

*, **, +, indican interacción densidad de siembra:dosis de N al 1,5 y 10 %, respectivamente.

Como se aprecia en la **Tabla 2** los experimentos evidenciaron un efecto interactivo entre la densidad de siembra y la dosis de N. En todos los casos cuando la dosis de N fue baja, los mayores rendimientos se obtuvieron con bajas densidades, por el contrario, cuando la oferta de N fue alta la mayor producción se registró con altas densidades. Esto coincide con lo encontrado por Ciampitti y Vyn (2011), quienes determinaron que el rendimiento solo respondió positivamente al aumento de la densidad cuando se aplicó N; según estos autores el mayor rendimiento en los tratamientos con altas densidades y dosis de fertilizante se asocia a una mayor producción de biomasa y en menor medida a aumentos en el índice de cosecha. Por su parte Pietrobon (2012) reportó este efecto interactivo solo para los componentes del rendimiento (número de granos y peso de 1000 granos) indicando que en el rendimiento no se observó este efecto debido a que se produjo una compensación entre ambos componentes. En Paraná (Argentina), Caviglia et al. (2007) encontraron que el rendimiento fue afectado tanto por efecto de la densidad de plantas como de la fertilización nitrogenada.

Optimización simultánea de la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno

En la **Tabla 3** se presentan para los Experimentos III, IV, V, VI y VII las densidades de siembra y dosis de N optimizadas de manera simultánea, como así también se indican los rendimientos alcanzados con dichos valores, así como también el valor de ajuste del modelo y los parámetros que resultaron significativos en el mismo.

Como se puede observar en la **Tabla 3**, tanto la densidad de siembra óptima como la dosis de N optimizadas variaron en todos los experimentos. Esto da indicios de la alta complejidad de esta interacción lo que hace que cada Experimento, en el cual las condiciones ambientales del cultivo fueron únicas, tenga una combinación propia de densidad de siembra y dosis de N.

Por otro lado, puede resaltarse siempre la interacción densidad de siembra por dosis de N fue significativa.

Determinación la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos

La relación entre la producción del cultivo y

Tabla 3. Densidad de siembra y dosis de N optimizados, rendimientos correspondientes a las dosis optimizadas y parámetros significativos.

	Exp III	Exp IV	Exp V	Exp VI	Exp VIII
N Optimizado	99	0	178	213	165
D Optimizada	64 242	112 476	135 000	90 000	107 296
Rto Optimizado (Kg ha ⁻¹)	11 295	11 272	12 259	11 000	10 000
Parámetros significativos	N D N2 D2 ND	N D D2 ND	N D N2 D2 ND	N D N2 D2 ND	N D N2 D2 ND

*Rto: Rendimiento; N: Nitrógeno; Densidad

los gramos de N disponible, cambió al cambiar la densidad de siembra (**Figura 1a**), lo mismo se observa en la relación entre la producción individual y el N disponible por planta (**Figura 1b, Tabla 4**).

Tabla 4. Densidad de siembra y dosis de N optimizados, rendimientos correspondientes a las dosis optimizadas y parámetros significativos.

Densidad (semillas ha ⁻¹)	g N p ⁻¹	Rendimiento IND (g p ⁻¹)	Rendimiento MAX (kg ha ⁻¹)
51 000	3.66	227.97	11 627
80 000	3.15	165.88	13 270
104 000	2.40	128.10	13 322
135 000	1.86	100.63	13 528

*gN p⁻¹: gramos de N por planta.

Como se observa en la Figura 1a, al incrementarse la densidad el rendimiento del cultivo aumenta para una misma cantidad de N disponible por planta, lo cual manifiesta una mayor

eficiencia en el uso del N. Ciampiti y Vyn (2011) encontraron que, al aumentar la densidad la eficiencia en el uso del N (EUN) fue superior. Similares resultados fueron hallados por Pietrobon (2012) quien reportó que el incremento en el número de plantas por unidad de superficie permitió producir mayor cantidad de granos por cada unidad de nutriente disponible para el cultivo, coincidiendo también con lo reportado por Boomsma et al., (2009).

Esta mayor eficiencia podría explicarse por el cambio que se genera en la estructura de la raíz al aumentar la densidad, lo cual genera una mayor captura de N en profundidad por contar con raíces más verticales, disminuyéndose así las pérdidas de este nutriente por lixiviación. Pietrobon (2009) encontró que la mayor EUN en los estadios iniciales se debió a una mayor eficiencia de recuperación de N (kg de N absorbido por kg de N disponible (ER)), mientras que la mayor EUN en estadios avanzados estuvo principalmente relacionada a una mayor eficiencia fisiológica (kg de materia seca producida por

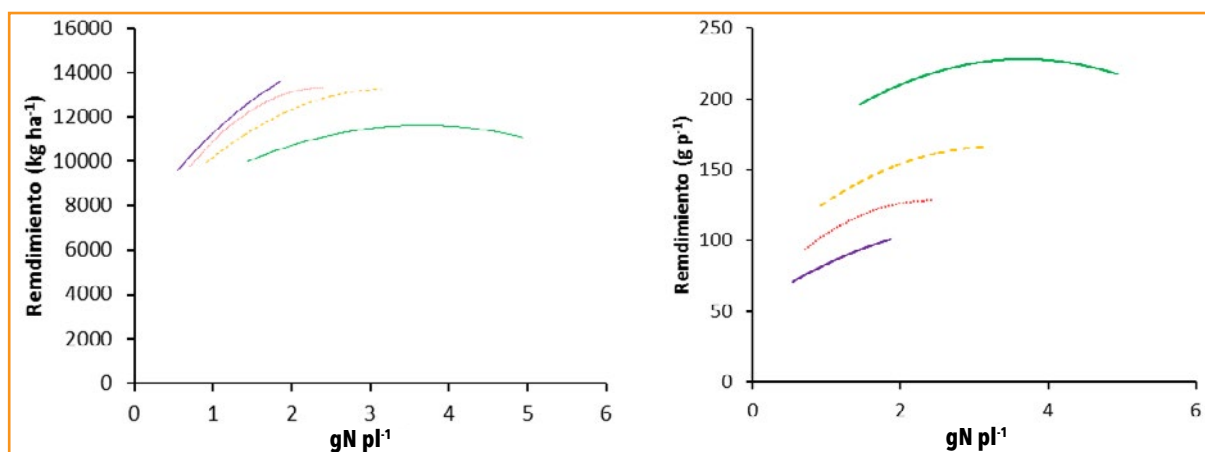


Figura 1. A: Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y gramos de N disponible por planta. B: Relación entre el rendimiento (g planta⁻¹) y gramos de N disponible por planta. Línea verde lлена: 51 000 semillas ha⁻¹; Línea amarilla punteada: 80 000 semillas ha⁻¹; Línea roja punteada: 104 000 semillas ha⁻¹; y Línea violeta lлена: 135 000 semillas ha⁻¹.

kg de N absorbido (EF)), Uribe Larrea et al. (2007) sugirieron que elevadas ER estarían fuertemente relacionadas con las raíces (tamaño y actividad) y que altas EF podrían estar altamente vinculadas a los componentes del Rendimiento (número de granos y peso).

Por otro lado, al analizar las **Figuras 1 a y 1b y la Tabla 4** anterior se puede observar que cuando la disponibilidad de N por plantas estuvo alrededor de los 3 gramos el rendimiento fue máximo.

Determinación de la Eficiencia Agronómica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

La eficiencia agronómica del fertilizante se presenta en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Eficiencia agronómica del fertilizante para distintos modelos de diagnóstico de fertilización.

Modelo	150-X	Balan- ce	MEME	Optimi- zación Simultánea (N*D)
Densidad (pl ha ⁻¹)	80 000	80 000	80 000	135 000
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	76	90	160	178
Rendimiento Testigo (kg ha ⁻¹)	10 069	10 069	10 069	9556
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	11 210	11 416	12 332	12 259
EA	14.95	14.87	14.17	15.19

La EA varío entre 14.17 y 15.19, siendo superior al utilizar la optimización simultánea. Estas diferencias en la EA podría explicarse porque ningún método evalúa correctamente las eficiencias del proceso (eficiencia de absorción y fisiológica).

Conclusiones

Tanto la densidad como la dosis de N afectaron de manera conjunta el rendimiento del maíz a través de su interacción, por lo que se debe comenzar a trabajar en modelos de diagnóstico de fertilización nitrogenada, que contemplen la misma, pudiéndose mejorar con ello la eficiencia del uso del fertilizante.

Bibliografía

- Andrade F., A.G. Cirilo, S. Uhart, y M. Otegui. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa- EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 227 pp.
- Andrade, F. H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero, y O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39(2), 453-459.
- Boomsma, C.R., J.B. Santini, M. Tollenaar, y T.J. Vyn. 2009. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: an analysis and review. *Agron. J.* 101: 1426-1452.
- Capristo, P.R., R.H. Rizzalli, y F.H. Andrade. 2007. Eco-physiological Yield Components of Maize Hybrids with Contrasting Maturity. *Agron. J.* 99, 1111.
- Ciampitti, I. A., y T.J. Vyn. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*. 121(1), 2-18.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Echeverría, H.E., F.O. García. 2014. Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos. Editores: Echeverría H.E. y F. García. 2da ed. Ediciones INTA. Buenos Aires. 904 pp.
- Esposito, G. 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias. UNC. 108 pp.
- Esposito, G., M. Díaz-Zorita, G. Balboa, C. Cerliani, y G. Martínez Bologna. 2014. Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Hörbe, T. A. N., T.J.C. Amado, A.D.O. Ferreira, y P.J. Alba. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4), 450-465.
- Karlen, D.L. y C.R. Camp. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the atlantic Coastal Plain. *Agronomy Journal*, 77:393-398.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. *Nitrogen in crop production, (nitrogenincropp)*, 391-416.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, H. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el Sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26(2): 179-188.
- Pietrobon, M. 2012. Densidad de plantas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) y su efecto sobre la eficiencia de uso de nitrógeno. Tesis. MSc UNdMP. 92 pp.
- Sangoi, L., M.L. Almeida, P.R.F. Silva, Y G. Argenta. 2002. Bases morfofisiológicas para maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. *Bragantia*, v.61, p.101-110.
- Sarlangue, T., F.H. Andrade, P.A. Calviño, y L.C. Purcell. 2007. Why Do Maize Hybrids Respond differently to Variations in Plant Density? *Agron. J.* 99, 984.
- Uribe Larrea, M., S.P. Moose, y F.E. Below. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use efficiency in maize hybrids. *Field Crops Res.* 100: 82-90. ●