

Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero*

Manuel Ferrari^{1,2}, L.A. Rivoltella¹ y J.M. Casado¹

Introducción

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) es un cultivo que en los últimos años ha comenzado a recobrar importancia en Argentina. En los sistemas de producción de distintas zonas del país se lo incluye por su rusticidad, adaptabilidad a suelos de inferior calidad, resistencia a la sequía y menor costo de implantación que el cultivo de maíz. Debido a la abundante producción de rastrojo de alta perdurabilidad y a su denso sistema radical, este cultivo realiza también un aporte importante a la sustentabilidad de los esquemas de agricultura continua a través de una mejora en el balance de carbono y de la estructuración de los suelos.

Un aspecto clave para lograr una buena rentabilidad y competitividad frente a otras opciones productivas es la adecuada nutrición nitrogenada del cultivo. El sorgo granífero posee un alto requerimiento de nitrógeno (N) (30 kg N t⁻¹ de grano producido; Ciampitti y García, 2007) y en numerosos trabajos realizados en diferentes regiones de la Argentina se han registrado respuestas positivas al agregado de este nutriente (De Battista et al., 2010; Fontanetto et al., 2010; Zamora et al., 2010). A pesar de ello, la información local sobre métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada que posibilite elaborar recomendaciones de fertilización con N sobre bases objetivas es aún escasa.

Fontanetto et al. (2008, 2010) evaluaron el nivel de N disponible a la siembra (suelo + fertilizante) hasta los 60 cm de profundidad en la zona central de Santa Fe, encontrando una buena asociación entre la oferta inicial de N y el nivel de rendimiento de grano alcanzado. Sin embargo, dicha herramienta no ha sido validada en otras zonas productivas. Por otro lado, no se conocen investigaciones en las cuales se hayan estudiado las posibilidades que otros elementos de diagnóstico, tanto de suelo (e.g., nitratos al estado de 6 hojas desarrolladas), como de planta (e.g., índice de verdor y reflectancia del canopeo determinados en distintos estados fenológicos), puedan ofrecer para predecir la respuesta del cultivo a la fertilización con N. Adicionalmente, tampoco se dispone de información sobre el momento más conveniente de aplicación del fertilizante nitrogenado (i.e., a la siembra y/o durante el

ciclo del cultivo), ni hasta qué estado fenológico podría demorarse el agregado de N para la corrección de las deficiencias.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar la utilidad de varios indicadores de suelo y planta como herramientas de diagnóstico de la condición de nutrición nitrogenada en el cultivo de sorgo granífero; y ii) estudiar el efecto de diferentes estrategias de aplicación del fertilizante nitrogenado sobre la productividad de grano de dicho cultivo.

Materiales y métodos

Durante la campaña 2009-10 se condujo un ensayo en el campo experimental de la EEA-INTA Pergamino (33° 56' S; 60° 34' W) sobre un suelo Argiudol típico, serie Pergamino, fase moderadamente erosionada (Capacidad de uso: IIe). El sitio tenía una historia de 15 años de agricultura continua, de los cuales los últimos 10 fueron manejados bajo un sistema de siembra directa. El cultivo antecesor fue soja.

Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones. Los tratamientos consistieron en 5 niveles de N aplicados como urea a la siembra en forma superficial (N₀=0, N₁=60, N₂=120, N₃=180 y N₄=240 kg N ha⁻¹) más un sexto tratamiento (N1R) en el cual la dosis de 120 kg N ha⁻¹ se aplicó en forma dividida (60 kg N ha⁻¹ a la siembra y 60 kg N ha⁻¹ con el cultivo en 10-11 hojas expandidas). El tamaño de las unidades experimentales



El manejo correcto del nitrógeno es un aspecto clave para mejorar la competitividad del cultivo de sorgo granífero.

¹ EEA-INTA Pergamino. Correo electrónico: mferrari@pergamino.inta.gov.ar

² UNNOBA.

* Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

fue de 4725 m (9 surcos) x 12 m. A fines de asegurar la suficiencia de fósforo (P) y azufre (S), todas las parcelas fueron fertilizadas con 25 kg P ha (como superfosfato triple) localizados en banda a la siembra y con 15 kg S ha⁻¹ (como sulfato de calcio) aplicados en cobertura total a la emergencia del cultivo.

El sorgo se sembró en forma directa el 05/11/09 a una densidad de 16 semillas m⁻¹ en surcos distanciados a 0.525 m entre sí y utilizando el híbrido Máximo (Criadero El Sorgal).

Las malezas fueron controladas convenientemente mediante tratamientos con herbicidas realizados en el barbecho y en pre-emergencia del cultivo. No se registraron ataques de insectos de importancia durante el ciclo, por lo que no fue necesario efectuar controles químicos.

A la siembra y antes de la aplicación del fertilizante nitrogenado se tomaron muestras de suelo de los espesores 0-20, 20-40 y 40-60 cm para la determinación de N-NO₃⁻ (método del ácido fenoldisulfónico). En cada bloque se extrajo una muestra compuesta (15 submuestras) para cada profundidad. La dotación de N en el suelo (Ns; 0-60 cm) fue obtenida en base a las concentraciones de N-NO₃⁻ y la densidad aparente de cada espesor de suelo. La disponibilidad de N a la siembra (Nd) en cada uno de los 5 tratamientos básicos fue luego calculada como la suma de Ns y la dosis de N del fertilizante (Nf) aplicada (Nd = Ns + Nf [kg N ha⁻¹]).

Cuando el cultivo alcanzó el estado de 6 hojas desplegadas se realizó otro muestreo de suelos (0-30 cm de profundidad) para la determinación de N-NO₃⁻. En este caso se tomó una muestra compuesta (10 submuestras) en cada parcela ubicando los piques en el centro de los entresurcos.

En los estados de 6-7 y 9-10 hojas expandidas se determinó el índice de verdor (IV) con un clorofilómetro

Minolta SPAD-502 (Minolta Camera Co., Ltd., Japón). Las lecturas de clorofila fueron efectuadas en 15 plantas representativas por parcela, realizando las mediciones en la última hoja expandida y aproximadamente en la mitad del largo de la lámina.

En dos momentos durante el ciclo del cultivo (6-7 y 10-11 hojas desplegadas), en todas las parcelas se tomaron también mediciones de reflectancia (NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada) con un sensor manual GreenSeeker (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA, USA), manteniendo una altura de lectura de 0.8-1.0 m por encima del canopeo.

Los rendimientos de grano (RG) fueron evaluados mediante cosecha manual de panojas el 19/04/10, tomando una muestra de 3.15 m² por parcela (en los mismos surcos en los que se habían efectuado las determinaciones de NDVI). Las panojas fueron luego desgranadas con una trilladora estacionaria y el rendimiento fue corregido a un contenido de humedad de 13.5%. El peso de 1000 granos (PMG) fue determinado en base al peso (corregido a 13.5% de humedad) de 4 muestras de 100 granos por parcela. La eficiencia agronómica de uso del N (EUN) fue calculada como el cociente entre la respuesta al N y la dosis de N utilizada:

$$EUN = \frac{[RG \text{ de la parcela fertilizada} - RG \text{ de la parcela testigo}]}{\text{Dosis de N}}$$

Los resultados de IV, RG, PMG y EUN fueron sometidos a análisis de varianza, y se compararon las medias de los tratamientos con el test de diferencias mínimas significativas (DMS; $\alpha=0.05$). Para el análisis conjunto de las respuestas a N obtenidas, los rendimientos medios de los tratamientos impuestos a la siembra fueron expresados como rendimiento relativo (RR), dividiendo su valor por el rendimiento medio alcanzado por el tratamiento N4. Los niveles críticos de las variables diagnóstico evaluadas fueron determinados mediante el

Tabla 1. Rendimiento de grano (RG), peso de mil granos (PMG) y eficiencia de uso del N (EUN) obtenidos en el ensayo.

Tratamiento	Dosis de N kg	RG* kg ha ⁻¹	PMG* g	EUN* kg grano kg N ⁻¹
N ₀	0	8612 c	26 954 a	-
N ₁	60	8974 bc	26 774 a	6.0 b
N ₁ R	120 (en 2 aplicaciones)	10 746 a	25 684 a	17.8 a
N ₂	120	9818 ab	26 669 a	10.1 ab
N ₃	180	9767 b	26 743 a	6.4 b
N ₄	240	9613 b	26 424 a	4.2 b
DMS ($\alpha=0.05$)		942.5	1392	8811
CV (%)		5.4	2.88	52.66

* Dentro de cada columna, letras distintas indican diferencias significativas (DMS; $p<0.05$).

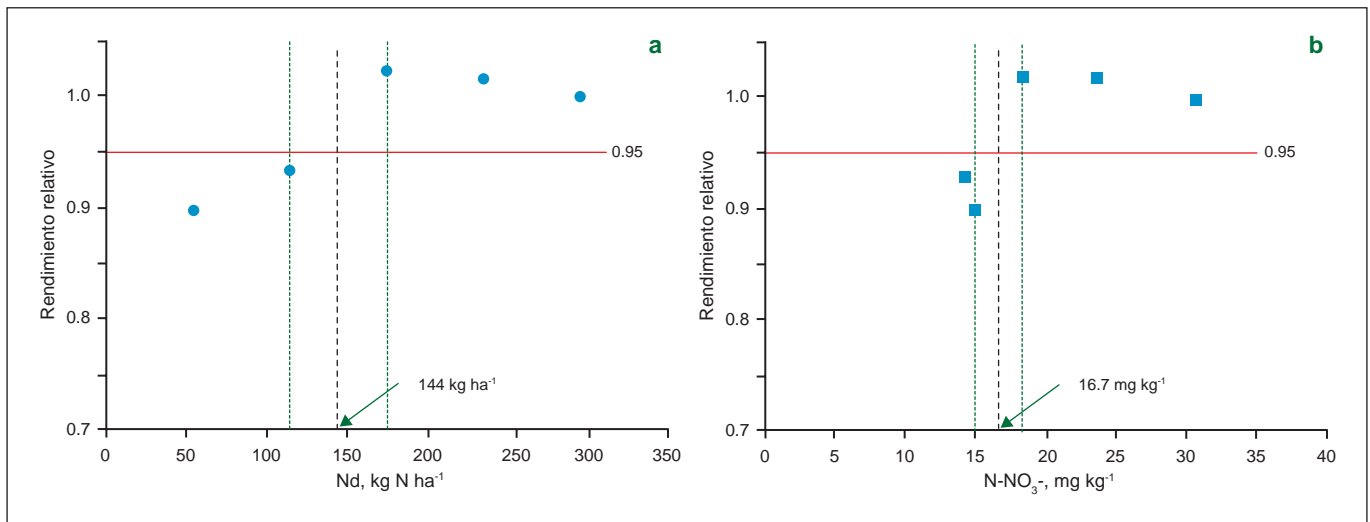


Figura 1. Relación entre los rendimientos relativos y (a) la disponibilidad de N a la siembra (Nd), y (b) la concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-30 cm) con el cultivo en 6 hojas expandidas.

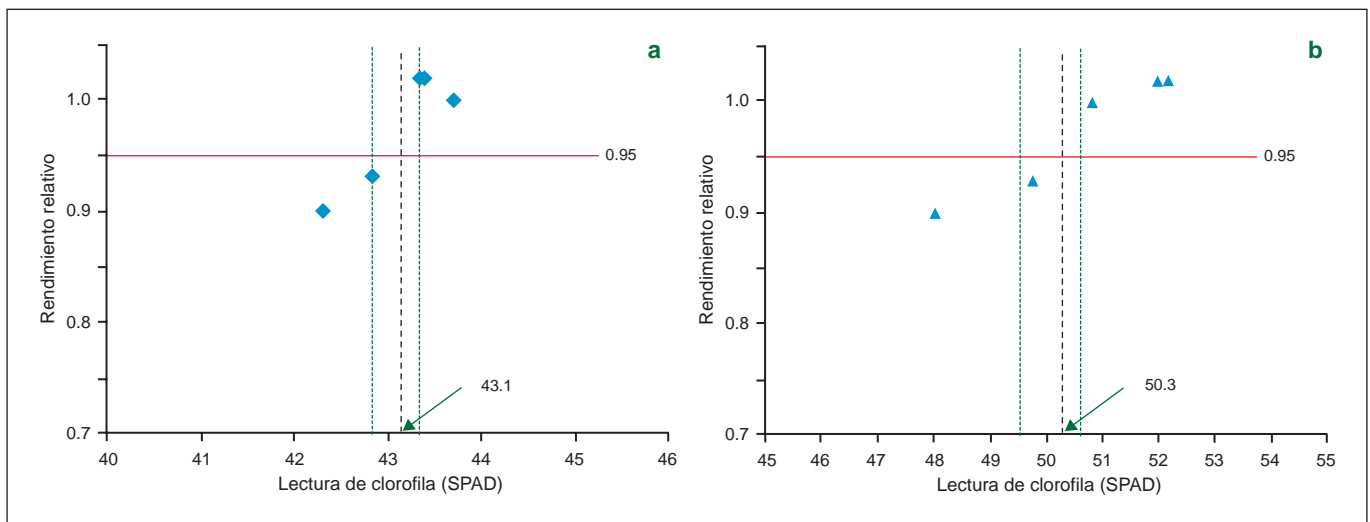


Figura 2. Relación entre los rendimientos relativos y el índice de verdor en (a) 6-7 hojas expandidas, y (b) 9-10 hojas expandidas.

método gráfico de Cate y Nelson (1965), fijándose un RR crítico de 0.95. La relación entre el rendimiento de grano y el NDVI fue analizada mediante regresión lineal simple.

Resultados y discusión

Los RG obtenidos fueron elevados, lo que fue favorecido por el abundante régimen de lluvias recibido (año “Niño”, característico de precipitaciones superiores a la normal en la región). Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo totalizaron 988 mm. Los tratamientos ensayados tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento de grano ($p < 0.01$) y sobre la EUN ($p < 0.05$), pero no afectaron el PMG ($p > 0.05$) (Tabla 1).

La relación entre los RR y el Nd se presenta en la Figura 1a. El análisis gráfico de los resultados permitió predecir la respuesta al N en base a un rango crítico ubicado aproximadamente entre los 114 y los 174 kg N ha⁻¹, cuyo valor medio (144 kg N ha⁻¹) podría ser considerado tentativamente como el nivel crítico. Dicho umbral es similar al encontrado en la zona central de Santa Fe por Fontanetto et al. (2008, 2010), quienes reportaron que

una oferta inicial de N cercana a los 130 kg ha⁻¹ permitió alcanzar rendimientos de sorgo de 8-10 t grano ha⁻¹.

La concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-30 cm) en el estado de 6 hojas también mostró una buena asociación con los RR (Figura 1b). En este caso fue igualmente posible identificar un rango crítico (entre 15.0 y 18.4 mg kg⁻¹), mediante el cual la respuesta al N pudo ser anticipada con una alta precisión. El valor medio de dicho intervalo (16.7 mg kg⁻¹) es algo inferior al nivel crítico encontrado por Ferrari et al. (2001) en el centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (20 mg kg⁻¹; 0-30 cm), pero coincidente con el rango crítico obtenido por García et al. (1997) en el sudeste de Buenos Aires (15-18 mg kg⁻¹; 0-30 cm), en ambos casos para el cultivo de maíz.

En los dos estados fenológicos en los cuales se efectuaron las mediciones, los valores de IV permitieron definir rangos críticos con los que fue factible separar claramente los puntos con (RR < 0.95) y sin respuesta (RR > 0.95) al agregado de N (Figura 2). Los niveles

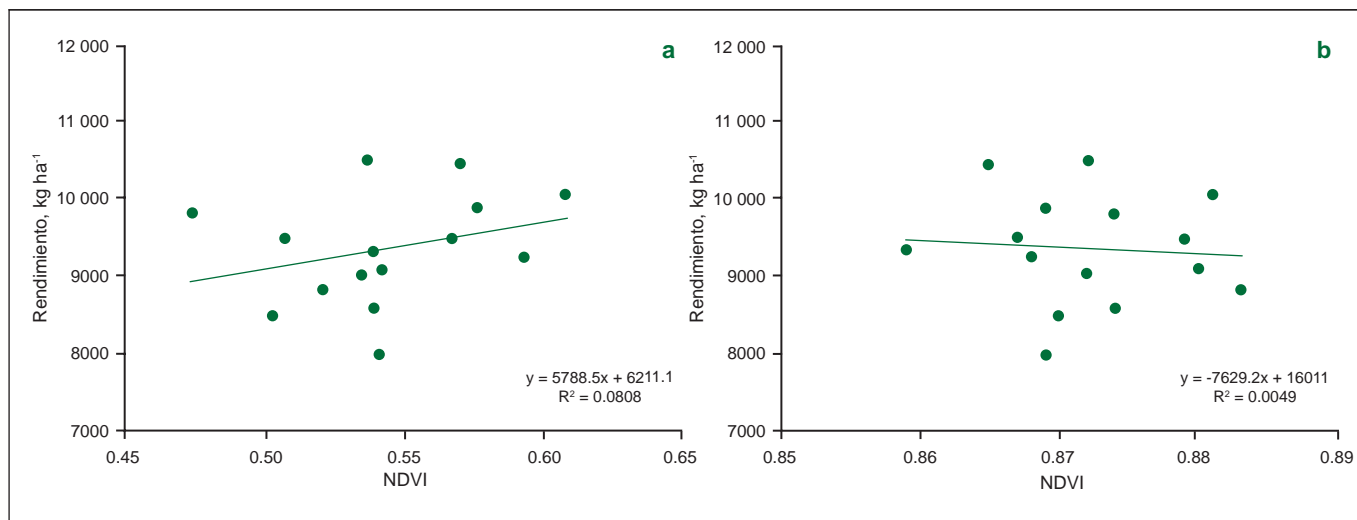


Figura 3. Relación entre los rendimientos de grano y el índice de vegetación de diferencia normalizada en (a) 6-7 hojas expandidas, (b) 10-11 hojas expandidas.

críticos tentativos (puntos medios de los rangos) se ubicarían cerca de las 43.1 y 50.3 unidades SPAD, para las lecturas tomadas en los estados de 6-7 y 9-10 hojas desplegadas, respectivamente.

El IV mostró una mayor habilidad para distinguir las dosis de N a medida que avanzó el ciclo del cultivo. Así, en el estado de 9-10 hojas se detectó un efecto significativo ($p < 0.05$) de los tratamientos sobre las lecturas de clorofila (datos no mostrados) y la diferencia máxima entre los valores medios de IV alcanzó las 4.2 unidades SPAD. En el estado de 6-7 hojas, en cambio, los tratamientos no afectaron las determinaciones ($p > 0.05$) y las lecturas medias exploraron un rango de sólo 1.4 unidades SPAD. Estos resultados indicarían la conveniencia de emplear esta herramienta de diagnóstico en un momento más avanzado del ciclo del cultivo, cuando el método presenta una mayor sensibilidad, si bien en el presente estudio el IV mostró la misma capacidad para predecir la respuesta a N en ambos estados (**Figura 2**). El incremento de la precisión del medidor de clorofila para detectar diferencias en la disponibilidad de N en estadios posteriores al de 6-7 hojas fue también reportado para maíz por Sainz Rozas y Echeverría (1998).

Un aspecto clave del método de diagnóstico y recomendación de fertilización nitrogenada basado en el empleo de sensores ópticos, es la ajustada predicción del rendimiento de grano a partir de las lecturas de reflectancia del canopeo tomadas durante el ciclo del cultivo (Raun et al., 2005). Utilizando este enfoque, se han desarrollado algoritmos para estimar la dosis de N a aplicar durante la estación de crecimiento en varios cultivos (disponibles en <http://www.soiltesting.okstate.edu/SBNRC/SBNRC.php>), pero aún no se dispone de dicho procedimiento de cálculo para sorgo granífero bajo las condiciones productivas de la Argentina.

En la **Figura 3** se presentan las relaciones encontradas

entre los valores de NDVI y de rendimiento de grano de todas las parcelas para los dos momentos durante el ciclo en que se tomaron las mediciones. En ambos casos, las asociaciones entre las variables fueron muy débiles. Estos resultados contrastan con los informados por Moges et al. (2007), quienes encontraron una relación lineal estrecha ($R^2 = 0.75$) entre el rendimiento en grano de sorgo y el NDVI determinado en el estado de crecimiento 3 (i.e., diferenciación del ápice, cultivo con 7 a 10 hojas desarrolladas; Vanderlip, 1993). El muy pobre ajuste obtenido en el estado de 10-11 hojas en este estudio podría deberse a que en ese momento el cultivo ya había cerrado totalmente los entresurcos. Bajo esa condición, las lecturas de reflectancia serían muy poco sensibles para detectar diferencias entre los tratamientos por efecto de la dosis de N, lo cual queda reflejado por el estrecho rango en el cual se concentraron todas las mediciones de NDVI (0.859-0.883; **Figura 3b**).

La comparación de los rendimientos obtenidos con los tratamientos N_1R y N_2 permite analizar cuál fue la estrategia de fertilización nitrogenada más conveniente bajo las condiciones en las cuales se realizó el ensayo (**Tabla 1**). El tratamiento N_1R presentó una marcada tendencia a superar al tratamiento N_2 tanto en rendimiento de grano como en EUN, aunque las diferencias no fueron significativas ($p > 0.05$). El mejor comportamiento insinuado por el tratamiento N_1R podría atribuirse a las abundantes precipitaciones registradas (524 mm) entre las aplicaciones de la urea a la siembra (12/11/09) y en 10-11 hojas (29/12/09). Si bien el suelo del sitio experimental (Argiudol típico) no presentaría un elevado potencial de lixiviación, la considerable magnitud de las lluvias ocurridas pudo haber ocasionado la pérdida en profundidad de nitratos derivados del fertilizante agregado en la implantación, impidiendo así que en el tratamiento N_2 el cultivo los pudiera absorber más adelante en el ciclo cuando la

demanda del nutriente comienza a incrementarse. De este modo, la estrategia representada por el tratamiento N_1R , de dividir la misma dosis de N en dos momentos de aplicación, habría resultado en una utilización más eficiente del nutriente, al diferir el aporte de la mitad del fertilizante a una etapa en la que el cultivo exhibe un alto requerimiento de N y, por lo tanto, una mayor tasa de absorción del mismo.

Por otro lado, las diferencias significativas en rendimiento ($p < 0.05$) y en EUN ($p < 0.05$) que se detectaron entre los tratamientos N_1 y N_1R indican que el cultivo de sorgo puede responder en forma apreciable al agregado de N aún en etapas tardías del ciclo como el de 10-11 hojas expandidas. Un requisito para el empleo de sistemas de manejo del N basados en sensores de reflectancia es que las deficiencias del nutriente puedan ser corregidas en estados avanzados dentro del periodo vegetativo del cultivo. En este sentido, los resultados mencionados pueden considerarse auspiciosos, aún cuando en este estudio no fue posible establecer una buena relación entre el NDVI y el rendimiento de grano.

Conclusiones

- La disponibilidad de N a la siembra, la concentración de $N-NO_3^-$ en el suelo con el cultivo en 6 hojas expandidas, y el índice de verdor determinado en los estados de 6-7 y 9-10 hojas desarrolladas permitieron predecir en forma precisa la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.
- El rendimiento en grano no se asoció con las lecturas de NDVI en ninguno de los dos momentos del ciclo del cultivo evaluados.
- La estrategia de dividir la aplicación de una misma dosis de N entre la siembra y el estado de 10-11 hojas resultó beneficiosa en una campaña caracterizada por un abundante régimen de lluvias.
- El cultivo de sorgo respondió significativamente al agregado de N aún en estados avanzados del ciclo como el de 10-11 hojas desplegadas.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos del proyecto de INTA PNCER-022421.

Bibliografía

- Cate, R.B. Jr., y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil tests analyses with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Stn., Int. Soil Testing Series Tech. Bull. No. 1.
- Ciampitti, I.A. y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, oleaginosos e industriales. Archivo Agronómico No. 11. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 33:13-16.

- De Battista, J.J., A.C. Alaluf, N.M. Arias, y M. Castellá. 2010. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo granífero *Sorghum bicolor* (L.) Moench. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 408-410. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina.
- Ferrari, M.C, J.J. Ostojic, L.A. Ventimiglia, H.G. Carta, G.N. Ferraris, S.N. Rillo, M.L. R. de Galetto, y F.M. Rimatori. 2001. Assessing soil and plant nitrogen tests for corn in the Humid Pampas (Argentina). En: Annual Meetings Abstracts, Charlotte, North Carolina, USA, October 2001. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. (en CD).
- Fontanetto, H., O. Keller, J. Albrecht, D. Giailevra,, C. Negro, y L. Belotti. 2008. Aspectos de manejo y fertilización nitrogenada para el sorgo granífero. Agromercado, Cuadernillo Clásico de Sorgo, No. 148, pp. 6-10.
- Fontanetto, H., O. Keller, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campaña 2008/09). Informaciones Agronómicas del Cono Sur 46:21-23.
- García, F.O., K.P. Fabrizio, M. Ruffo, y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. En: Actas VI Congreso Nacional de Maíz, Tomo II, pp. 137-143. Pergamino, Buenos Aires, noviembre de 1997. AIANBA, Pergamino, Argentina.
- Moges, S.M., K. Girma, R.K. Teal, K.W. Freeman, H. Zhang, D.B. Arnall, S.L. Holtz, B.S. Tubaña, O. Walsh, B. Chung, y W.R. Raun. 2007. In-season estimation of grain sorghum yield potential using a hand-held optical sensor. Archives of Agronomy and Soil Science 53(6):617-628.
- Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, y G.V. Johnson. 2005. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36:2759-2781.
- Sainz Rozas, H., y H.E. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. Rev. Fac. Agron., La Plata 103(1):37-44.
- Vanderlip, R.L. 1993. How a sorghum plant develops. Kansas State University, 20 p.
- Zamora, M., A. Melin, y S. Balda. 2010. Fertilización con nitrógeno y azufre en sorgo granífero en el centro de Buenos Aires. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 444-446. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina. *