

Respuestas en rendimiento a la aplicación de fósforo, azufre y zinc en maíz tardío en la región pampeana norte argentina

Carlos L. Michiels*

Introducción

El maíz es uno de los cultivos más importantes de Argentina. A su vez, desde el punto de vista productivo, el maíz es una actividad fundamental dado su aporte en la sostenibilidad de la capacidad productiva de nuestros suelos. En la región pampeana, el rendimiento potencial de maíz se maximiza en las fechas de siembra tempranas debido a mayores tasas de crecimiento por planta y, por ende, mayor fijación de estructuras reproductivas durante el periodo crítico (Andrade et al., 1996; Otegui et al., 2004). Esto se debe a que el cultivo explora una estación de crecimiento más favorable en términos de radiación y de temperatura. Sin embargo, en amplias regiones de la zona núcleo pampeana, existen restricciones como la disponibilidad hídrica, que hacen poco viable el uso de aquel concepto como único elemento de análisis a la hora de planificar un cultivo de maíz (Otegui et al., 2002).

En este sentido, muchos estudios concluyen que las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento en los cultivos de secano (Andrade et al., 1996; Dardanelli et al., 2004). Por lo tanto, la elección de la fecha de siembra constituye una decisión de gran impacto sobre la dinámica del agua en el cultivo de maíz en secano, ya que la oferta de agua se basa en las precipitaciones ocurridas durante el periodo comprendido entre la madurez fisiológica del cultivo precedente y la siembra, y las ocurridas durante el ciclo del cultivo (Maddoni, 2009).

Actualmente, en la región pampeana argentina coexisten al menos dos sistemas de producción de maíz. Por un lado, el sistema tradicional de producción denominado "Maíz temprano" (MTe), donde el cultivo se siembra hacia fines del invierno-inicio de primavera y, por otro lado, el sistema usualmente denominado "Maíz tardío" (MTa), en el que el cultivo se siembra a fin de primavera-inicio de verano en una ventana de 1-1.5 meses desde mediados de noviembre hasta, usualmente, inicio de enero. Ambos sistemas productivos exploran diferentes ambientes, ya sea por ubicar sus etapas fenológicas bajo distintas condiciones climáticas como por implantarse sobre condiciones de estado del suelo diferentes (Bert y Satorre, 2012). Así, cada sistema presenta ventajas y desventajas que se manifiestan en distintos rendimientos.

Tradicionalmente, MTe fue el sistema productivo predominante, sin embargo, durante las últimas campañas, el MTa ha expresado buenos resultados productivos y, en consecuencia, ha aumentado su frecuencia entre los productores. La fecha de siembra tardía en maíz aparece como una alternativa interesante,

ya que permite implantar el cultivo cuando el perfil del suelo tiene mayor cantidad de agua disponible y esto lo independiza en parte, de las variaciones en la oferta de agua durante su ciclo. Tomar la decisión de sembrar maíz fuera de la fecha óptima conlleva sacrificar rendimiento potencial en pos de darle estabilidad a este cultivo en regiones donde los periodos de balance hídrico negativo son frecuentes durante la estación de crecimiento (Duarte, 2002). En la región pampeana, en general, es frecuente la ocurrencia de bajas precipitaciones en enero, lo que sumado a la alta demanda atmosférica que se registra en esta época resulta en sequías estacionales (Maddoni, 2011). Tanto el agua como el nitrógeno (N) deben ser provistos en cantidad y oportunidad para asegurar un estado fisiológico óptimo al momento de la floración del cultivo de maíz, momento alrededor del cual, en mayor medida, se determina el rendimiento (Andrade et al., 1996). Una posibilidad para evitar la coincidencia de la floración del maíz con la sequía estacional del verano, es sembrar el cultivo al final de la estación primaveral, de manera que la floración femenina ocurra a mediados del verano y el periodo de llenado de los granos se desplace a finales del verano y otoño (Maddoni, 2011).

Una de las principales ventajas de esta decisión de manejo es que aumentan los rendimientos mínimos, otorgándole más estabilidad al productor en su sistema de producción. Sin embargo, en torno a esta decisión de manejo se asumen algunos cambios en el paquete tecnológico aplicado respecto a MTe. En primer término se asume que el cultivo tiene una menor demanda de insumos tales como semilla, debido a la menor densidad de siembra, agroquímicos por una rápida cobertura del suelo en estadios tempranos, y fertilizantes debido a que la demanda general del cultivo es menor en términos de requerimientos de nutrientes y la disponibilidad es mayor por transcurrir el mismo su ciclo con mayores temperaturas medias.

Lo citado anteriormente ocurre porque en fecha de siembra tardía hay una menor proporción de crecimiento reproductivo sobre el vegetativo, debido al deterioro de las condiciones de radiación, una baja en las temperaturas durante el llenado de granos y un mejor ambiente para el crecimiento inicial (Cirilo y Andrade, 1994). A su vez, la mineralización de la materia orgánica del suelo aumenta con las mayores temperaturas en siembras tardías, reduciendo así la respuesta al agregado del nutriente (Melchiori y Caviglia, 2008).

En toda la región pampeana ha sido bien estudiado que los mayores rendimientos de MTe se obtienen con ofertas

* Ing. Agr. Especialista en Fertilidad y Fertilizantes. Asesor privado. Consultor de empresas. Correo electrónico: michielscarlos@gmail.com

de N (N-nitrato suelo + N fertilizante aplicado) de 140 kg N ha⁻¹, para la pampa arenosa (Barraco y Díaz-Zorita, 2005) hasta ofertas de 180 kg N ha⁻¹ para la región núcleo maicera (García et al., 2010); existiendo también suficiente información relativa a la importancia de la fertilización con nutrientes como fósforo (P) y azufre (S) (García et al., 2010). Además de los macronutrientes, en las últimas campañas se diagnosticaron y midieron respuestas a micronutrientes, especialmente el zinc (Zn) (Michiels y Ruffo, 2012).

Para MTa se han documentado respuestas en rendimiento y dosis óptimas de N de 150 kg ha⁻¹ en la pampa arenosa (Proot et al., 2011), así como avances en la calibración de umbrales críticos de N en Entre Ríos (Díaz Valdez et al., 2014), entre otros trabajos. Sin embargo, la información sobre otros nutrientes como P, S y Zn sigue siendo escasa y poco consistente.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de MTa a la fertilización con N, P, S y Zn en una red de evaluación durante dos campañas (2012-2013 y 2013-2014), para generar información que ayude en la toma de decisiones de la nutrición de MTa a técnicos y productores. Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar la respuesta en rendimiento de MTa a la nutrición completa (NPSZn) vs. la nutrición básica (N o NP)
- Validar localmente umbrales de diagnóstico para Zn

Materiales y métodos

Se realizaron ensayos en 10 sitios experimentales ubicados en diversas localidades de la región pampeana Norte durante las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Los tratamientos evaluados incluyeron: N; NP; NPS y NPSZn. Las fuentes utilizadas fueron urea (46-0-0), fosfato monoamónico (FMA) (11-52-0), MES10™ (12-40-0-10S) y MESZ™ (12-40-0-10S-1Zn), estos dos últimos productos

Tabla 1. Tratamientos evaluados en los diez sitios experimentales.

Tratamiento	N	P	S	Zn
----- kg ha ⁻¹ -----				
N	180			
NP	180	35		
NPS	180	35	20	
NPS + Zn 0.5	180	35	20	0.5
NPS + Zn 1.0	180	35	20	1.0
NPS + Zn 1.5	180	35	20	1.5
NPS + Zn 2.0	180	35	20	2.0

de Mosaic Argentina S.A. Las dosis de N, P y S fueron de 180 kg N ha⁻¹ (N suelo + N fertilizante), 35 kg P ha⁻¹, 20 kg S ha⁻¹. Se evaluaron 4 dosis de Zn: 0; 1.0; 1.5 y 2.0 kg Zn ha⁻¹ (**Tabla 1**).

Los tratamientos fueron aplicados a la siembra e incorporados al costado y debajo de la línea de siembra con máquina estándar. Los tratamientos se balancearon con N a una dosis final de 180 kg N ha⁻¹ entre disponibilidad en el suelo a la siembra más N aplicado como fertilizante, mediante la aplicación de urea a la siembra y en algunas situaciones incorporada en forma previa a la misma.

El diseño fue en bloques completos al azar y se realizaron cuatro repeticiones de cada tratamiento. Las parcelas estándar fueron de 30 m y al menos 8 surcos de ancho pero se ajustaron de acuerdo al equipo de siembra disponible en cada sitio. Las diferencias no fueron significativas en términos operativos como para detallar las mismas.

Se realizó una caracterización inicial de los sitios donde se realizaron los ensayos (**Tabla 2**). Para ello en cada sitio

Tabla 2. Caracterización química de los suelos pertenecientes a los diez sitios experimentales.

Año	Sitio	MO	pH	Pe	N-NO ₃	S-SO ₄	Zn
		%	----- mg kg ⁻¹ -----				
2012	Adelia María	2.5	6.0	26	16	7	0.6
	Alejo Ledesma	1.9	6.5	18	17	7	0.7
	América	1.3	6.0	14	10	2	0.5
	Charras	0.9	6.0	9	9	6	0.2
	Pergamino	2.7	5.8	12	10	7	0.7
2013	Río Cuarto	1.3	6.3	14	8	6	0.3
	América	1.5	6.0	14	23	3	0.8
	Oliveros	2.1	5.5	18	15	11	0.8
	Pergamino	3.3	5.5	23	24	5	1.1
	Pasco	2.6	5.9	16	27	14	0.3

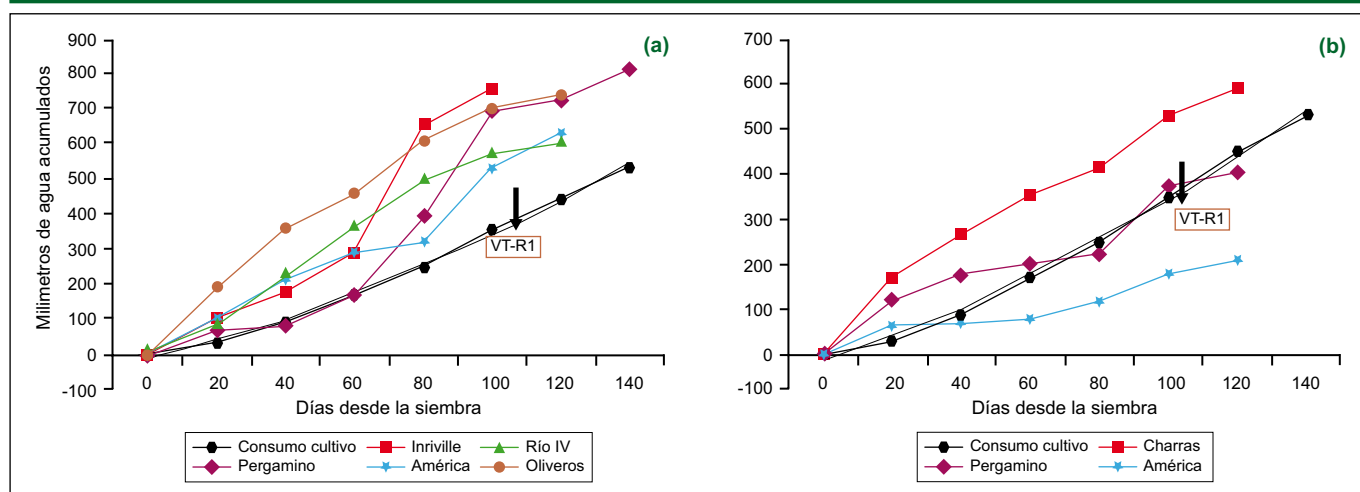


Figura 1. Consumo estimado de agua (Andriani, 1997) y precipitaciones acumuladas en localidades cercanas a los sitios experimentales durante el ciclo de cultivo para las campañas 2012-2013 (a) y 2013-2014 (b).

Tabla 3. Rendimientos por sitio de los distintos tratamientos para los ensayos de las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Se indica la significancia de las diferencias entre tratamientos dentro de cada sitio.

Sitio	N	NP	NPS	NPS 0.5 Zn	NPS 1.0 Zn	NPS 1.5 Zn	NPS 2.0 Zn	C.V. (%)	Valor p
2012									
Adelia María	8633 E	8505 F	8884 C	8783 D	8808 CD	8987 B	9168.5 A	0.56	0.0001
Alejo Ledesma	10 338	10 601	10 966	10 911	10 683	10 659	11 114	5.6	0.87
América	7297 C	7748 BC	8187 AB	8062 AB	8339 AB	8644 A	8331.5 AB	3.06	0.017
Charras	11 608 C	12 769 A	12 700 AB	12 292 AB	12 459 AB	12 118 BC	12 143 BC	4.49	0.03
Pergamino	6990 D	6845 D	7900 C	8060 BC	8625 AB	8620 AB	8966 A	8.91	< 0.0001
Río Cuarto	11 950	12 217	12 342	12 452	12 424	12 013	12 841	6.79	0.92
2013									
América	7676	7940	7977	7945	7841	7737	7754	7.5	0.98
Oliveros	9554	9451	9290	9328	9413	9319	9068	2.5	0.15
Pergamino	12 018	12 036	12 598	12 826	13 433	12 263	12 246	8.9	0.51
Pasco	7736	7376	7497	7493	8079	6324	7615	18.9	0.72

y previo a la siembra, se tomaron muestras compuestas representativas de los primeros 20 cm del perfil de suelo. Las muestras fueron enviadas a laboratorios comerciales de análisis de suelos, donde se determinó la concentración de P extractable (Pe, método de Bray y Kurtz I), $N-NO_3^-$ (método del ácido fenoldisulfónico), azufre como sulfato ($S-SO_4^{2-}$, extracción por método de Morgan y determinación por turbidimetría con $BaCl_2$), materia orgánica (MO, método de Walkley y Black) y pH en agua relación 1: 2.5 (potenciometría). También se evaluó la disponibilidad de Zn, la cual se determinó utilizando el método conocido como DTPA (solución extractora DTPA). A su vez fueron tomadas muestras en las profundidades de 20-40 cm y de 40-60 cm donde se determinaron los contenidos de $N-NO_3^-$ y $S-SO_4^{2-}$ y $N-NO_3^-$ respectivamente.

Los datos fueron analizados utilizando el procedimiento MIXED de SAS (Littell et al., 1996). Se analizaron todas las localidades en forma conjunta considerando al sitio

como un factor fijo y a los años y bloques, anidados en las localidades, como factores aleatorios. Las diferencias entre medias fueron evaluadas mediante el test de mínima diferencia significativa ($\alpha = 0.10$). La relación entre la respuesta a la fertilización con Zn a dosis de 1.0 $kg\ ha^{-1}$ y las propiedades del suelo se analizó mediante análisis de correlación y regresión lineal.

Resultados y discusión

Los parámetros de fertilidad química fueron variables dentro de los valores promedios encontrados en la región donde se condujeron los ensayos y en concordancia con lo relevado por distintos autores en numerosas publicaciones dentro de la región pampeana (Sainz Rosas et al., 2013) (Tabla 2). Los porcentajes de materia orgánica y los valores de pH estuvieron dentro del rango considerado normal para el desarrollo de cultivos sin limitaciones correspondientes a lotes en producción

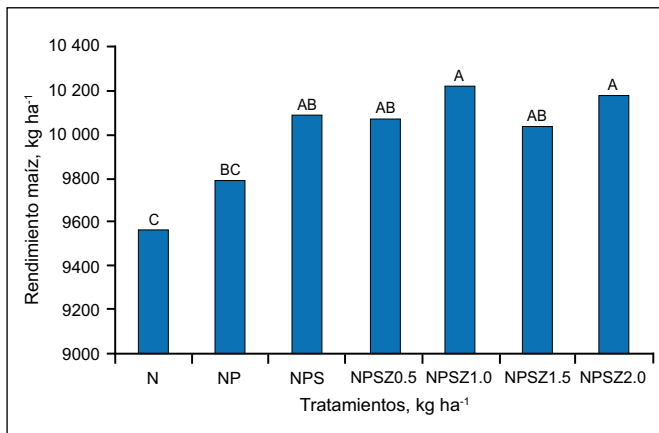


Figura 2. Rendimientos promedio de maíz para los tratamientos con N, P, S y Zn para los nueve ensayos conducidos en las campañas 2012-2013 y 2013-2014. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.10$).

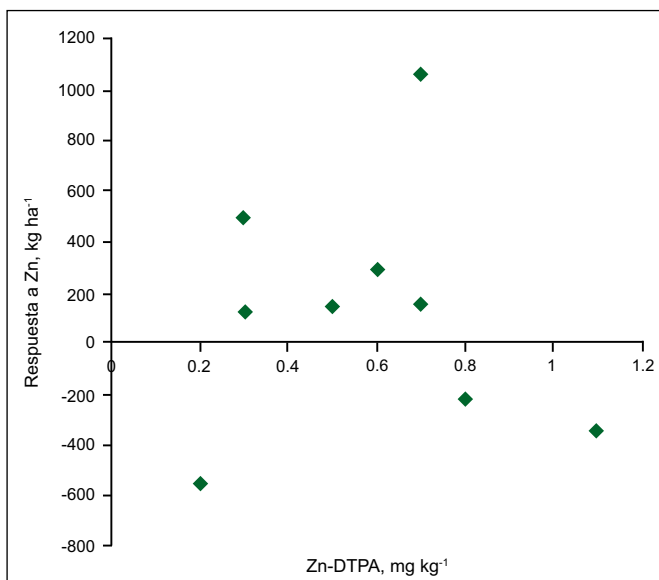


Figura 3. Relación entre la respuesta a la aplicación de Zn y el nivel de Zn del suelo extraído con DTPA para los 10 sitios experimentales.

agrícola continua. Los niveles de Pe se ubicaron dentro de los rangos medios de la región y cercanos o por encima del umbral de respuesta de 19 mg kg^{-1} P Bray-1 (Gutiérrez Boem et al., 2010). Relativo a $\text{S-SO}_4^{=}$, los valores encontrados estuvieron por debajo del umbral de 10 mg kg^{-1} citado en la red de ensayos de larga duración de CREA Sur de Santa Fe (García et al., 2010). Con respecto a Zn, salvo un sitio con valor cercano al umbral citado por la literatura (Martens y Lindsay, 1990), el resto de las muestras presentaron valores por debajo del rango de suficiencia para el método utilizado.

La relación entre las precipitaciones acumuladas (Pp) en ciclo de cultivo para los sitios de experimentación y el consumo de agua (C) (Andriani, 1997), se presentan en la **Figura 1 a y b**. En la campaña 2012, las Pp durante el periodo crítico del cultivo (VT-R1) estuvieron cercanas o por debajo del C en la mayoría de sitios evaluados (**Figura 1a**), mientras que para 2013 ocurrió lo contrario (**Figura**

1b), poniendo de manifiesto el contraste en cuanto a oferta hídrica entre ambas campañas.

Los rendimientos por sitio se pueden ver en la **Tabla 3**. El análisis conjunto de todos los sitios mostró un efecto significativo de los tratamientos ($p = 0.0059$), localidades ($p < 0.0001$) e interacción entre localidad y tratamiento ($p = 0.041$). Por alto coeficiente de variación, el sitio Pasco fue descartado para este análisis integrado de los sitios. El rendimiento promedio de los tratamientos en los nueve sitios se presenta en la **Figura 2**. El rendimiento más elevado se obtuvo con el tratamiento NPS+Zn (1 kg ha^{-1}). La respuesta promedio de dicho tratamiento fue del 7% (662 kg ha^{-1}) y 4.4% (435 kg ha^{-1}) respecto a N y NP, respectivamente siendo ambas estadísticamente significativas ($p < 0.10$). No se observaron diferencias significativas entre NPS+Zn (1 kg ha^{-1}) y NPS, ni entre este último con NP. Considerando sólo los sitios donde se observó una respuesta significativa, el tratamiento N+P+S+Zn de 1.0 kg ha^{-1} rindió 11% (926 kg ha^{-1}), 7% (591 kg ha^{-1}) y 2% (140 kg ha^{-1}) más que N, NP y NPS, respectivamente.

En el análisis individual por sitio, se observó respuesta significativa a los tratamientos en 4 de las 9 localidades, mientras que en las otras 5 no se detectó una respuesta significativa. Los cuatro sitios con respuesta correspondieron a la campaña 2012-2013: Adelia María, América, Charras y Pergamino. Las respuestas fueron significativas a P en América y Charras, dos sitios con niveles de Pe menores de 15 mg kg^{-1} , pero no se observó respuesta en sitios de Pe similares como Pergamino 2012. En el caso de S, las respuestas significativas se registraron en Adelia María y Pergamino, pero estas respuestas no se pudieron correlacionar con niveles de $\text{S-SO}_4^{=}$ u otras variables. La respuesta a la aplicación de Zn fue significativa en Adelia María, América y Pergamino.

A diferencia de lo observado en otras redes en MTe (Michiels y Ruffo, 2012), estas respuestas no estuvieron correlacionadas con la concentración de MO. Tampoco se encontró relación con las otras propiedades de suelo analizadas como pH y contenido de Zn (**Figura 3**). Esta red demuestra que la deficiencia de nutrientes como P, S y Zn puede ser un factor limitante de la productividad del MTa en la región pampeana y que los mismos deben ser considerados en los planes de nutrición del cultivo.

Agradecimientos

A los cooperadores que llevaron adelante estos ensayos.

A los propietarios de los establecimientos, encargados y responsables de campos que hicieron un valioso aporte para que esto se concretase en situaciones reales de producción.

A Mosaic de Argentina S.A. por el soporte financiero para estos ensayos.

Bibliografía

- Andrade, F.H., A.G. Cirilo, S.A. Uhart, y M.E. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Dekalb Press. 292 p. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires.
- Andriani, J.M. 1997. Uso del agua y riego. Capítulo del libro "El cultivo de soja en la Argentina", editado por Laura Giorda y Hector Baigorri. E.E.A. Marcos Juaréz. INTA. Editorial Editar San Juan. Argentina. pp. 141-150.
- Barraco, M., y M. Díaz Zorita. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivo de maíz en Hapludoles típicos. *Ciencia del Suelo* 23:197-203.
- Bert. F., y E.H. Satorre. 2012. Sistemas de producción de maíz: maíz temprano y tardío en Manual de Cultivo de Maíz 2012. Aapresid. www.aapresid.org.ar. Rosario. Argentina.
- Cirilo, A.G., y F.H. Andrade. 1994. Sowing date and maize productivity: Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science* 34:1039-1044.
- Dardanelli, J., D. Collino, M.E. Otegui, y V. Sadras. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción. En: Satorre, E.H., R.L. Benech Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui, y R. Savin. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, FAUBA. pp. 377-434.
- Díaz Valdez, S., F.O. García, y O.P. Caviglia. 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. En Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. 5-9 Mayo 2014.
- Duarte, G. 2002. Modelos de producción de maíz en la región de la Pampa Arenosa. Guía Dekalb del cultivo de maíz. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 220-221.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo. 2010. *La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009*. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 p.
- Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para Soja, Maíz y Trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 Junio de 2010. Rosario. Argentina.
- Littell, R.C., Milliken, G.A. Stroup, W.W., and Wolfinger, R.D. 1996. *SAS system for mixed models*. SAS Institute, Cary, NC. 633 p.
- Maddonni, G.A. 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo de agua en maíz. XVII Congreso Aapresid. Actas. Rosario, Santa Fe, 19 al 21 de agosto de 2009. Rosario: Aapresid. 195 p.
- Maddonni, G.A. 2011. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - A probabilistic approach. *Theoretical Application Climatology* 107:325-345.
- Martens, D.C. y W.L. Lindsay. 1990. Testing soils for Copper, Iron, Manganese, and Zinc. En: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, pp. 229-264.
- Melchiori, R.J.M., y O.P. Caviglia. 2008. Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research* 108:198-205.
- Michiels, C. L. y M.L. Ruffo. 2012. El zinc limita el rendimiento del maíz en la región pampeana argentina. Actas CD XIX Congreso Latinoamericano – XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Buenos Aires. Argentina.
- Otegui, M.E., J. Mercau, y F.J. Menéndez. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: Satorre, E.H. (Ed.) *Guía Dekalb del cultivo de maíz*. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 172-178.
- Otegui, M.E., y M. López Pereira. 2004. Fecha de siembra. En: Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, FAUBA. pp. 259-275.
- Proot, A., M. Barraco, C. Scianca, y C., Álvarez. 2010. Efecto de la fertilización nitrogenada y de la densidad de siembra sobre los rendimientos y la eficiencia de uso de agua en maíces tardíos en la pampa arenosa. EEA INTA Villegas. Memoria técnica 2010-2011.
- Sainz Rozas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Simposio Fertilidad 2013. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. p. 62.72.



Deficiencia de Zn en maíz