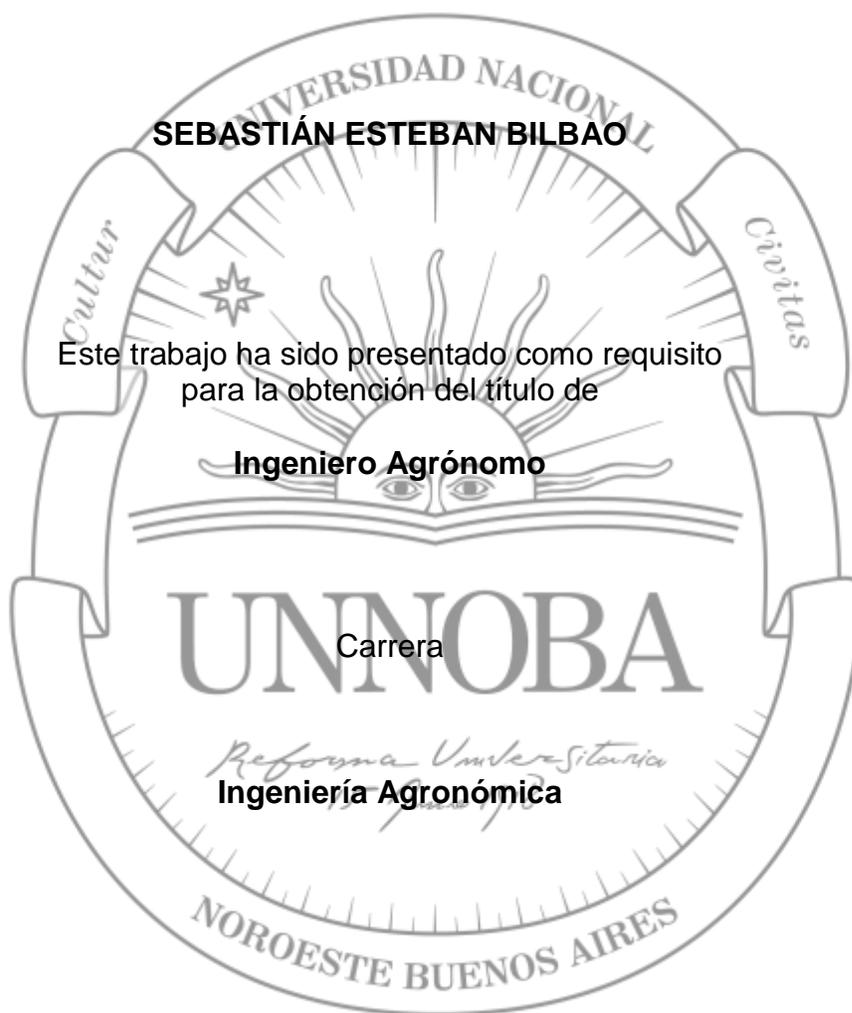


RESPUESTA DEL CULTIVO DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) A DISTINTOS NUTRIENTES EN EL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Trabajo Final de Grado
del alumno



**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires**

Pergamino, 27 de agosto de 2020

RESPUESTA DEL CULTIVO DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) A DISTINTOS NUTRIENTES EN EL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Trabajo Final de Grado

del alumno

SEBASTIÁN ESTEBAN BILBAO

Aprobada por el Tribunal Evaluador

(Nombre y Apellido)
Evaluador 1

(Nombre y Apellido)
Evaluador 2

(Nombre y Apellido)
Evaluador 3

Ing. Agr. Andrés Llovet
Co-Director

Ing. Agr. Manuel Ferrari
Director

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Pergamino, 27 de agosto de 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo, y por ayudarme siempre a seguir adelante.

A los profesores de esta Universidad, por los conocimientos transmitidos e inculcados durante toda la carrera.

A los profesionales que me ayudaron a llevar a cabo esta tesina: mi director, Ingeniero Agrónomo Manuel Ferrari, por su colaboración y aguante, y a mi co-director, Ingeniero Agrónomo Andrés Llovet, por sus aportes durante este trabajo.

A todos mis amigos por estar siempre.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	3
1. RESUMEN.....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	7
2.1. Hipótesis.....	13
2.2. Objetivos	
2.2.1. Objetivo General.....	13
2.2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Sitio Experimental y Tratamientos Evaluados.....	14
3.2. Implantación del Ensayo.....	15
3.3. Conducción del Cultivo.....	16
3.4. Determinaciones de Suelo y Planta.....	16
3.5. Análisis Estadísticos.....	18
3.6. Datos Climáticos.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Condiciones Climáticas de la Campaña 2013/2014.....	20
4.2. Caracterización Edáfica del Sitio Experimental y Disponibilidad Inicial de Nutrientes.....	22
4.3. Rendimiento de Grano, Densidad de Panojas y Respuesta a los Distintos Nutrientes.....	22
4.4. Respuesta al Nitrógeno y Herramientas de Diagnóstico Evaluadas.....	23

4.5. Respuesta al Fósforo y Nivel del Nutriente en el Suelo.....	28
4.6. Respuesta al Azufre y Disponibilidad del Nutriente en el Suelo.....	28
4.7. Respuesta al Zinc y Dotación del Nutriente en el Suelo.....	29
5. CONCLUSIONES.....	31
6. BIBLIOGRAFÍA.....	32
7. ANEXOS.....	35
7.1. ANEXO I: Plano de Campo del Ensayo.....	36
7.2. ANEXO II: Análisis Estadístico de los Resultados.....	37

1. RESUMEN

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) tuvo una amplia difusión en Argentina, pero en las últimas décadas ha perdido competitividad frente a otras opciones agrícolas de verano. Una mejor nutrición del cultivo, basada en resultados experimentales probados que permitan realizar recomendaciones de fertilización correctas, posibilitaría incrementar su rentabilidad y, en consecuencia, su posicionamiento frente a otras alternativas productivas. Sin embargo, la información sobre respuesta a la fertilización y sobre métodos de diagnóstico para los principales nutrientes que limitan los rendimientos de grano del cultivo es muy escasa en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Los objetivos de este trabajo fueron: a) Cuantificar los efectos de la fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y zinc (Zn) sobre el rendimiento del cultivo de sorgo, y b) Estudiar el grado de asociación de las respuestas del cultivo de sorgo al agregado de N, P, S y Zn con determinaciones analíticas de suelo y mediciones en planta. El ensayo fue realizado en la campaña agrícola 2013/2014 en un establecimiento agropecuario de la localidad de Martínez de Hoz (Partido de Lincoln, Provincia de Buenos Aires), sobre un suelo Hapludol éntico. Se utilizó un diseño experimental en bloques completamente aleatorizados con cuatro repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron: T: 0 (Testigo); PS: 25 kg P/ha + 18 kg S/ha; NS: 180 kg N/ha + 18 kg S/ha; NP: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha; NPS: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha + 18 kg S/ha; y NPS+Zn: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha + 18 kg S/ha + 1,3 kg Zn/ha. El agregado conjunto de N, P, S y Zn incrementó el rendimiento de grano en 1983 kg/ha ($p < 0,05$). Para cada nutriente en forma individual, las respuestas fueron de 714 kg grano/ha ($p < 0,05$) para N, 1.562 kg grano/ha ($p < 0,05$) para P, 163 kg grano/ha ($p > 0,05$) para S, y 318 kg grano/ha ($p > 0,05$) para Zn. La dotación de N en el suelo (0-60 cm) a la siembra, la concentración de N-nitratos en el suelo (0-30 cm) con el cultivo en 7-8 hojas desplegadas, y el índice de verdor en hoja determinado con un clorofilómetro portátil en el estado de 10 hojas expandidas predijeron eficazmente la respuesta a N. El nivel de P extractable en el suelo (0-20 cm) a la siembra anticipó en forma correcta la respuesta del cultivo al agregado de P. La disponibilidad inicial de S-sulfatos en el suelo (0-20 cm) presentó cierto grado de asociación con la tendencia a incrementar el rendimiento de grano producida por la aplicación de S, pero los resultados no permitieron concluir plenamente acerca de la utilidad de este indicador como herramienta de diagnóstico. La concentración de Zn en el suelo (0-20 cm) aparentó ser un método promisorio para evaluar el estatus nutricional del cultivo respecto a este elemento, aunque sería necesario estudiarlo en un mayor número de sitios.

Palabras clave: sorgo granífero, respuesta a la fertilización, diagnóstico de deficiencias, nitrógeno, fósforo, azufre, zinc.

2. INTRODUCCIÓN

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) es una especie de origen tropical perteneciente a la familia de las Poáceas, que ha sido adaptada, a través del mejoramiento genético, a una gran diversidad de ambientes. En Argentina se adapta muy bien a la Región Pampeana, la que en sentido Norte a Sur pasa gradualmente de clima subtropical a clima templado, y se caracteriza, además, por presentar un gradiente ascendente en las precipitaciones de Oeste a Este. También puede ser cultivado en cualquier otra zona agrícola argentina, gracias a su adaptación natural a la escasez hídrica. El sorgo necesita 400 mm de agua disponible para alcanzar niveles óptimos de rendimiento y un mínimo de 250 mm para producir rendimientos aceptables (Chessa, 2013). Asimismo, posee un mecanismo natural de latencia que le permite detener su crecimiento ante una carencia de lluvias, para reiniciarlo apenas las condiciones ambientales sean favorables. Esta característica le confiere al cultivo una alta seguridad de producción y cosecha de sus granos (Chessa, 2013).

A nivel mundial, la producción de sorgo en el año 2017 fue de 57,6 millones de toneladas, con un área cosechada de 40,7 millones de hectáreas (FAO, 2019), lo que resulta, en un rendimiento promedio de 1,42 t de grano/ha. En la Figura 1 se puede observar la evolución que han tenido la producción y la superficie cosechada de sorgo granífero en el mundo en el período 1994-2017.

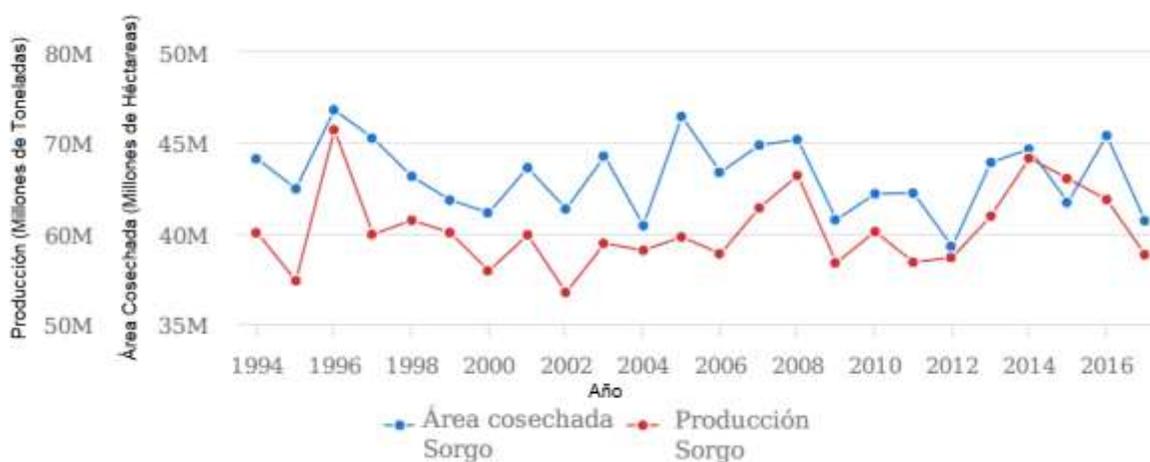


Figura 1. Producción de grano y área cosechada de sorgo granífero en el mundo en el período 1994-2017 (FAO, 2019).

Siempre de acuerdo a las estadísticas de la FAO (2019), la producción de grano de sorgo mencionada lo ubica como el quinto cereal en importancia en el mundo, detrás del maíz, el trigo, el arroz y la cebada.

Según la misma fuente (FAO, 2019), en el período 1994-2017 Argentina ocupó el octavo lugar en producción de sorgo granífero a nivel mundial. El mayor productor fue Estados Unidos, país que generó más de 10 millones de toneladas como promedio anual (Figura 2).

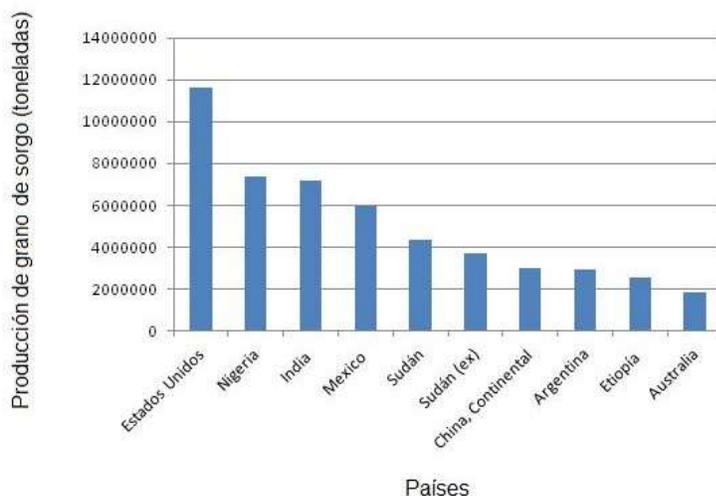


Figura 2. Producción de sorgo granífero de los principales países en el período 1994-2017 (FAO, 2019). *Sudán (ex): Sur de Sudán; China, Continental: es la denominación convencional para la zona de China bajo la soberanía efectiva de la República Popular China, sin incluir a las regiones administrativas especiales de Hong Kong y Macao.*

En cuanto a la superficie destinada al cultivo en nuestro país, el máximo valor en el área sembrada, con 3.121.600 hectáreas, se alcanzó en la campaña 1970/71. En los últimos 25 años, sin embargo, la superficie implantada de sorgo granífero solamente en cuatro campañas superó el millón de hectáreas (Secretaría de Agroindustria, 2019). En la campaña 2017/18, se logró cosechar un total de 437.400 ha, con un rendimiento promedio nacional de sólo 3.574 kg/ha (Secretaría de Agroindustria, 2019), siendo el principal motivo de la baja productividad obtenida la escasez de agua que predominó durante el período crítico del cultivo, lo cual afectó severamente el rendimiento de grano. Para esa misma campaña, la producción total lograda ascendió a 1.563.445 toneladas, un 38% menos que la obtenida en la campaña previa (2016/17), en la cual se produjeron 2.526.931 toneladas (Secretaría de Agroindustria, 2019).

Al sorgo se lo incluye en los sistemas de producción por ser un cultivo rústico, de gran adaptabilidad a suelos de menor aptitud, con un destacable comportamiento ante condiciones de déficit hídrico y un menor costo de implantación que el cultivo de maíz. Gracias a su abundante producción de rastrojo de alta perdurabilidad y a su denso sistema radical, el cultivo contribuye también a la sustentabilidad de los sistemas de agricultura continua mediante una mejora en el balance de carbono y en la estructura de los suelos (Ferrari *et al.*, 2012).

A nivel local, el grano de sorgo es utilizado para la alimentación animal en reemplazo del maíz, ya sea seco o ensilado como grano húmedo. A nivel mundial, en cambio, alrededor del 40 % de la producción se destina a la alimentación humana. Al tratarse de un cultivo muy versátil, también es utilizado como reserva forrajera, como cultivo diferido en pie para el otoño-invierno, o bien como silo de planta entera (Melin y Zamora, 2007).

A pesar de sus diversos beneficios, una de las limitaciones que actualmente encuentra el cultivo en la Argentina para incrementar su adopción es el mercado. No obstante, mediante el mejoramiento genético se han obtenido híbridos con calidad nutritiva elevada, lo que permite reemplazar al maíz en la alimentación animal y humana, como así también en procesos industriales. Esta diversidad de usos del grano de sorgo acrecienta las posibilidades de atender satisfactoriamente a los mercados externos presentes o que puedan emerger en un futuro (Chessa, 2012).

Otro factor que dificulta una mayor difusión de este cultivo es la escasa competitividad frente a otras opciones productivas (Ferrari, 2016). En este sentido, cabe mencionar que el nivel tecnológico aplicado en el manejo del sorgo granífero generalmente es más bajo que el utilizado en la conducción de otros cultivos, como por ejemplo el maíz, lo cual redundaría en menores rendimientos de grano y, por lo tanto, en una reducción de la rentabilidad. Así, el empleo de fertilizantes es marcadamente inferior en sorgo granífero que en maíz. Estimaciones realizadas para la campaña agrícola 2013/14 por Fertilizar Asociación Civil (2014), indican que sólo el 68% del área sembrada con sorgo fue fertilizada mientras que el maíz recibió fertilizantes en el 93% de la superficie. En cuanto a las dosis medias empleadas, las mismas fueron de 138 y 194 kg producto comercial/ha para sorgo y maíz, respectivamente.

De las consideraciones anteriores surge que una adecuada nutrición del cultivo, basada en resultados experimentales robustos que permitan efectuar

recomendaciones de fertilización correctas, constituye una de las vías que permitiría incrementar la rentabilidad y competitividad del sorgo granífero.

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia e intensidad se presenta en deficiencia para el cultivo. En orden de importancia, le sigue el fósforo (P) y, en los últimos años, se han comprobado también deficiencias de azufre (S) en algunas áreas agrícolas de Argentina (Fontanetto *et al.*, 2010; Zamora *et al.*, 2011; Barbagelata *et al.*, 2014).

El sorgo granífero presenta un elevado requerimiento de N para su producción (30 kg N/t de grano producido; Ciampitti y García, 2007). En diversos trabajos realizados en diferentes regiones de la Argentina, se han encontrado respuestas positivas al agregado de este nutriente (De Battista *et al.*, 2010; Fontanetto *et al.*, 2010; Zamora *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2012; Mieres y Royo, 2015; Barraco *et al.*, 2016).

Una de las herramientas utilizadas para diagnosticar los requerimientos de N en sorgo granífero consiste en tomar muestras de suelo a la siembra de los espesores 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm de profundidad para determinar el contenido de N de nitratos (N-NO_3^-). Mediante este método, la dotación de N en el suelo (N_s ; 0-60 cm) se obtiene en base a las concentraciones de N-NO_3^- y la densidad aparente de cada espesor de suelo. La disponibilidad de N a la siembra (N_d) es luego calculada como la suma de N_s y la dosis de N del fertilizante (N_f) aplicada ($N_d = N_s + N_f$ [kg N/ha]). Los resultados obtenidos con esta metodología permitieron predecir la respuesta al N de una manera eficaz en investigaciones realizadas en la zona de Pergamino (Ferrari *et al.*, 2012), en el centro de Santa Fe (Fontanetto *et al.*, 2008, 2010), y en distintos ambientes de la Provincia de Entre Ríos (Barbagelata *et al.*, 2014).

Otra herramienta para evaluar la condición de nutrición nitrogenada del cultivo se basa en el muestreo de suelo en el entresurco (0-30 cm de profundidad) para la determinación de la concentración de N-NO_3^- cuando el cultivo alcanza el estado de 6 hojas desplegadas. En el trabajo de Ferrari *et al.* (2012) ya mencionado, este método también mostró una muy buena asociación con la respuesta al N, posibilitando que la misma sea anticipada con una alta precisión.

Un tercer método para evaluar el estatus nitrogenado del cultivo es a través del índice de verdor (IV) de las hojas medidas con un clorofilómetro Minolta SPAD-502. Ferrari *et al.* (2012) reportaron que 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 detectaron un efecto significativo de los tratamientos sobre las

lecturas de clorofila 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 y las lecturas medias exploraron un rango de sólo 1,4 unidades SPAD.

Una última herramienta para efectuar el diagnóstico de N emplea mediciones de reflectancia (NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada) del canopy realizadas con un sensor manual, por ejemplo el GreenSeeker, durante el ciclo del cultivo (6 a 12 hojas desplegadas). Utilizando este enfoque, se han desarrollado algoritmos para estimar la dosis de N a aplicar durante la estación de crecimiento en varios cultivos. Si bien en Argentina este método ha sido aún relativamente poco evaluado y desarrollado en sorgo granífero, los resultados obtenidos hasta el momento no muestran una buena asociación entre los valores de NDVI y los rendimientos de grano (Ferrari *et al.*, 2012), ni tampoco una variación consistente de las lecturas de reflectancia ante ofertas crecientes de N (Barraco *et al.*, 2016).

La utilidad de algunos de los métodos de diagnóstico para N en el cultivo de sorgo granífero que se utilizan actualmente en nuestro país (disponibilidad de N a la siembra, Nd; concentración de N-NO₃ en el suelo con el cultivo en el estado de 6 hojas; e índice de verdor en hoja, IV) no ha sido validada aún para el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

Al igual que en otros cultivos, en el sorgo granífero la respuesta a la fertilización fosfatada estaría correlacionada con el nivel de P (Bray 1) en el suelo. Conceptualmente, la escala sería la siguiente: en suelos que presentan entre 0 y 5 mg/kg P Bray 1, existe una muy alta probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada; entre 5 y 10 mg/kg, la probabilidad de respuesta es alta; entre 10 y 20 mg/kg, la expresión de la respuesta depende de otros factores de manejo; y superando los 20 mg/kg, la probabilidad de respuesta es baja (Salas y Lovera, 1997). Sin embargo, es esperable que el nivel crítico de fósforo extractable (Bray 1; 0-20 cm) dependa de cada zona, y no en todas ellas esta información está disponible. No se conocen estudios realizados en Argentina sobre metodología de diagnóstico para P en el cultivo de sorgo granífero.

Con respecto al S, el número de trabajos en los que se ha evaluado este nutriente es relativamente bajo en comparación con el N. En un ensayo realizado en el área de Rafaela (Santa Fe) se registraron respuestas significativas al S cuando este nutriente fue acompañado del agregado de N, mientras que el incremento del rendimiento debido al S fue prácticamente nulo cuando el tratamiento no incluyó también al N. Estos resultados demuestran que una

deficiencia de N puede limitar la expresión de la respuesta a la fertilización azufrada (Fontanetto *et al.*, 2010). Ferraris *et al.* (2013) también reportaron mayores producciones de grano de sorgo en respuesta al agregado de S en Pergamino, pero dichos aumentos de rendimiento no fueron estadísticamente significativos.

En la práctica, existen dificultades para realizar recomendaciones de fertilización de S análogas a las del N, principalmente debido a la falta de correlación entre los niveles de sulfatos en el suelo y el rendimiento o la respuesta del cultivo. (Melin y Zamora, 2007). El efecto de la fertilización azufrada sobre el rendimiento del sorgo no ha sido suficientemente evaluado en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, región en la cual tampoco ha sido probada la relación entre la respuesta al S y la disponibilidad de este nutriente en el suelo.

El Zinc (Zn) es un micronutriente cuya utilización últimamente ha despertado interés en ciertos cultivos extensivos de la Argentina, como por ejemplo el maíz (Barbieri *et al.*, 2015). Las investigaciones sobre este microelemento en sorgo son relativamente más escasas. En un trabajo conducido en la zona de Pergamino se detectó un incremento de rendimiento ante el agregado de este nutriente (+736 kg/ha), aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa (Ferraris *et al.*, 2012). En un segundo estudio realizado en la misma localidad, la respuesta al agregado de Zn tampoco fue significativa y en este caso mostró una tendencia negativa (-66 kg/ha; Ferraris *et al.*, 2013). No se tiene conocimiento de que el efecto del Zn sobre el rendimiento de grano de sorgo haya sido evaluado en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En dicha zona, sin embargo, se han reportado incrementos significativos de rendimiento debidos a este micronutriente en el cultivo de maíz, en particular con aplicaciones de Zn en la semilla (Ciarlo *et al.*, 2013).

Sobre la base de lo mencionado anteriormente, surge la necesidad de conducir estudios en el cultivo de sorgo en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires que posibiliten cuantificar la respuesta al agregado de N, P, S y Zn y, asimismo, generar o validar información sobre herramientas de diagnóstico de deficiencias para estos cuatro nutrientes.

2.1. Hipótesis

- En el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, el sorgo granífero incrementa su rendimiento ante el agregado de N, P, S y Zn.

- Las respuestas a N, P, S y Zn se encuentran asociadas a determinaciones de suelo y/o planta, las cuales pueden ser utilizadas como herramientas de diagnóstico.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Investigar el efecto de diferentes nutrientes sobre el rendimiento del cultivo de sorgo granífero en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

2.2.2. Objetivos Específicos

1) Cuantificar los efectos de la fertilización con N, P, S y Zn sobre el rendimiento del cultivo de sorgo.

2) Estudiar el grado de asociación de las respuestas del cultivo de sorgo al agregado de N, P, S y Zn con determinaciones analíticas de suelo y mediciones en planta.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio Experimental y Tratamientos Evaluados

El ensayo se condujo en la localidad de Coronel Martínez de Hoz, Partido de Lincoln, Provincia de Buenos Aires, en el establecimiento “El As de Copas”.

Los suelos del lote en donde se instaló el experimento están comprendidos en la unidad cartográfica Or24 (INTA, 2013), la que posee una Capacidad de Uso Ilw y un Índice de Productividad de 75 y, dentro de ella, en una loma perteneciente a la serie Norumbega (Hapludol éntico).

El lote seleccionado había sido manejado con agricultura continua al menos a partir del año 1996, y desde hacía aproximadamente 10 años se encontraba bajo siembra directa. La rotación previa adoptada fue soja de primera - trigo/soja de segunda - maíz. El cultivo antecesor al ensayo fue trigo/soja de segunda (campaña 2012/2013). Al momento de instalar el experimento, la cobertura de rastrojos era alta a muy alta.

Se utilizó un diseño experimental en bloques completamente aleatorizados, con cuatro repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron:

- T: 0 (Testigo)
- PS: 25 kg P/ha + 18 kg S/ha
- NS : 180 kg N/ha + 18 kg S/ha
- NP: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha
- NPS: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha + 18 kg S/ha
- NPS + Zn: 180 kg N/ha + 25 kg P/ha + 18 kg S/ha + 1,3 kg Zn/ha

La implementación de dichos tratamientos se realizó de la siguiente manera:

- T: sin fertilizante.
- PS: 125 kg de Superfosfato triple/ha incorporado en banda a la siembra (29/10/2013) + 87 kg de Yeso agrícola/ha aplicado al voleo en cobertura total luego de la siembra, con el cultivo comenzando a emerger (aproximadamente, con el 30% de plantas emergidas; 6/11/2013).
- NS: 391 kg de Urea granulada/ha aplicada al voleo en cobertura total luego de la siembra + 87 kg de Yeso agrícola/ha aplicado al voleo en cobertura total luego de la siembra, en ambos casos con el cultivo comenzando a emerger (aproximadamente, con el 30% de plantas emergidas; 6/11/2013).

- NP: 125 kg de Superfosfato triple/ha incorporado en banda a la siembra (29/10/2013) + 391 kg de Urea granulada/ha aplicada al voleo en cobertura total luego de la siembra, con el cultivo comenzando a emerger (aproximadamente, con el 30% de plantas emergidas; 6/11/2013).
- NPS: 125 kg de Superfosfato triple/ha incorporado en banda a la siembra (29/10/2013) + 391 kg de Urea granulada/ha aplicada al voleo en cobertura total luego de la siembra + 87 kg de Yeso agrícola/ha aplicado al voleo en cobertura total luego de la siembra, en estos dos últimos casos con el cultivo comenzando a emerger (aproximadamente, con el 30% de plantas emergidas; 6/11/2013).
- NPS + Zn: 125 kg de Superfosfato triple/ha incorporado en banda a la siembra (29/10/2013) + 391 kg de Urea granulada/ha aplicada al voleo en cobertura total luego de la siembra + 87 kg de Yeso agrícola/ha aplicado al voleo en cobertura total luego de la siembra, en estos dos últimos casos con el cultivo comenzando a emerger (aproximadamente, con el 30% de plantas emergidas; 6/11/2013) + 1,73 l Basfoliar Zn 75 FLO/ha aplicado por vía foliar a mochila con un caudal de 114 l de agua/ha en el estado vegetativo de 10 hojas desplegadas (20/12/2013).

El Grado (contenido porcentual de nutrientes en peso, en el orden N-P-K-Ca-Mg-S) de los fertilizantes sólidos granulados utilizados es 0-20-0-14-0-1, para el Superfosfato triple; 0-0-0-23,3-0-20,6, para el Yeso agrícola (Sulfato de calcio); y 46-0-0-0-0-0, para la Urea granulada. La concentración de Zn del producto Basfoliar Zn 75 FLO es de 75% Zn (p/v).

El tamaño de las unidades experimentales (parcelas) fue de 3,15 m (6 surcos a 52,5 cm) de ancho por 20 m de largo.

En el ANEXO I se muestra el plano de campo del ensayo.

3.2. Implantación del Ensayo

El híbrido sembrado fue el ADV 114 de la empresa ADVANTA. Este material es de tipo granífero, de ciclo súper precoz, grado de madurez I, 63 días a floración, 145 cm de altura, tipo de panoja semicompacta, y con alto contenido de taninos en el grano.

No se realizaron análisis del poder germinativo (PG) de la semilla, tomando como referencia lo indicado por el rótulo de la bolsa fiscalizada (PG mínimo: 80%). Las semillas se encontraban curadas con Thiram (fungicida informado en el rótulo)

y luego las mismas fueron también tratadas con el antídoto de herbicidas Concep III (Fluxofenim 96%)

Previo a la siembra (principios de junio de 2013), en el lote se realizó un barbecho químico mediante la aplicación de 2 l/ha de Glifosato 48% + 0,6 l/ha de 2,4-D éster 100% + 1,5 kg/ha de Atrazina 90%, con un caudal de 100 l/ha de agua.

El ensayo fue sembrado el 29/10/2013 con una sembradora Agrometal TX Mega (13 surcos a 52,5 cm entre sí), anulando el cuerpo de siembra central para así implantar dos parcelas adyacentes de 6 surcos cada una en una misma pasada de la máquina. La densidad de siembra empleada fue de 18,5 semillas por metro lineal, y la profundidad osciló entre 2,5 y 5 cm (promedio: 3 cm).

El mismo 29/10/2013, y luego de realizada la siembra, se efectuó una aplicación de herbicidas de pre-emergencia para el control de las malezas durante el ciclo del cultivo, utilizando 2 l/ha de Glifosato 48% + 1,5 kg/ha de Atrazina 90% + 2 l/ha de Acetoclor (84%) con protector, y un caudal de aplicación de 100 l/ha de agua.

3.3. Conducción del Cultivo

No se volvió a aplicar herbicidas durante el ciclo del cultivo, ya que las parcelas en general se mantuvieron limpias de malezas, habiendo sido sólo necesario realizar un control mecánico manual (con motoguadaña) en sectores de algunas parcelas para controlar principalmente “pasto cuaresma” (*Digitaria sanguinalis*).

Cuando el cultivo se encontraba en estado reproductivo (5/2/2014), se realizó un tratamiento de insecticidas para el control de pulgón, aplicando una mezcla de 0,5 l/ha de Clorpirifos 48% + 20 cm³/ha de Gammacialotrina 15% con un caudal de 80 l/ha de agua, el cual permitió controlar efectivamente la plaga.

3.4. Determinaciones de Suelo y Planta

A efectos de realizar una caracterización del sitio experimental y determinar la disponibilidad inicial de los nutrientes en evaluación (N, P, S y Zn), el mismo día de la siembra del ensayo (29/10/2013) se realizó un muestreo de suelo por bloque. De cada bloque se obtuvieron muestras compuestas (15 submuestras) de los

espesores 0-20, 20-40 y 40-60 cm, localizando los piques en el centro de los entresurcos del sorgo previamente sembrado. Las muestras en el campo se fueron colocando en conservadoras con congelantes inmediatamente después de extraídas, y posteriormente se mantuvieron en heladera hasta su procesamiento. Las mismas fueron luego secadas al aire, y molidas y tamizadas a 2 mm, para finalmente ser enviadas al Laboratorio SUELOFERTIL (Asociación de Cooperativas Argentinas CL, Pergamino) para los análisis respectivos.

En las muestras del espesor 0-20 cm se determinó: pH en agua (1:2,5; potenciométrico); P extractable (Bray y Kurtz N°1); materia orgánica (Walkley y Black); N total (Kjeldahl); N-NO₃⁻ (ácido fenoldisulfónico); S-SO₄²⁻ (turbidimetría); y Zn (extracción con DTPA y lectura con espectrofotómetro de absorción atómica). En las muestras de 20-40 y 40-60 cm se hicieron determinaciones de N-NO₃⁻ (ácido fenoldisulfónico) y S-SO₄²⁻ (turbidimetría) solamente.

Durante el ciclo del cultivo, y a fin de determinar la concentración de N-NO₃⁻ en el suelo, en las parcelas de los tratamientos PS y NPS de cada uno de los 4 bloques se extrajeron muestras compuestas (15 submuestras) a 0-30 cm de profundidad, localizando el barreno en el centro de los entresurcos del cultivo cuando éste presentaba 7-8 hojas expandidas (11/12/2013). A medida que se fueron extrayendo, las muestras se colocaron en el campo en conservadoras con congelantes y luego fueron pasadas a heladera. Posteriormente, se secaron al aire, y fueron molidas y tamizadas a 2 mm, para finalmente ser enviadas al Laboratorio SUELOFERTIL para la determinación de N-NO₃⁻ (método del ácido fenoldisulfónico).

En dos momentos de la estación de crecimiento del cultivo, en las parcelas de los tratamientos PS y NPS de los 4 bloques se realizaron también mediciones de IV utilizando un clorofilómetro Minolta SPAD-502. A tal fin, se evaluaron 15 plantas representativas por parcela, tomando las lecturas en la última hoja totalmente desplegada, a 0,5 cm del borde y en el tercio central de la lámina. La primera medición se realizó cuando el cultivo se encontraba en el estado de 7-8 hojas expandidas (11/12/2013), y la segunda cuando el mismo presentaba 10 hojas desplegadas (20/12/2013).

El día 10/1/2014 se realizaron observaciones fenológicas en todas las parcelas del ensayo a efectos de registrar las diferencias en el desarrollo del cultivo detectadas entre los distintos tratamientos evaluados.

La cosecha de las parcelas se realizó el 25/4/2014 mediante recolección manual de panojas, tomando 2 muestras de 5 m² cada una (4,76 m lineales de

dos surcos adyacentes a 52,5 cm entre sí) por parcela. En esa superficie se cortaron con tijera de podar todas las panojas presentes (con unos 30 cm de raquis), salvo aquellas verdes y sin grano (producto de un macollo tardío o una segunda panoja tardía dentro del mismo tallo), que no fueron incluidas en las muestras.

Posteriormente, se contó el número de panojas por muestra en gabinete y se procedió al desgranado de las mismas mediante una trilladora estacionaria. Los granos recolectados de cada muestra fueron limpiados (ventilados), y luego pesados con una balanza digital, determinándose también el contenido de humedad de los mismos con un higrómetro portátil a efectos de expresar los rendimientos corregidos a 13,5% de humedad.

3.5. Análisis Estadísticos

Los resultados obtenidos se sometieron a análisis de la variancia, efectuándose las comparaciones de medias a través del test de diferencias mínimas significativas (DMS) de Fisher con un nivel de significancia (α) de 0,05. Todos los análisis fueron realizados con el software InfoStat versión 2018 (InfoStat, 2018).

La respuesta a los distintos nutrientes evaluados fue calculada como:

- ❖ Respuesta a N (kg/ha) = Rendimiento del tratamiento NPS (kg/ha) – Rendimiento del tratamiento PS (kg/ha)
- ❖ Respuesta a P (kg/ha) = Rendimiento del tratamiento NPS (kg/ha) – Rendimiento del tratamiento NS (kg/ha)
- ❖ Respuesta a S (kg/ha) = Rendimiento del tratamiento NPS (kg/ha) – Rendimiento del tratamiento NP (kg/ha)
- ❖ Respuesta a Zn (kg/ha) = Rendimiento del tratamiento NPS + Zn (kg/ha) – Rendimiento del tratamiento NPS (kg/ha)

3.6. Datos Climáticos

A efectos de caracterizar la disponibilidad hídrica a lo largo de la estación de crecimiento, se registraron las precipitaciones diarias durante todo el ciclo del

cultivo (Siembra-Cosecha) con un pluviómetro localizado aproximadamente a 200 m del sitio experimental. Las lluvias acumuladas durante el barbecho (1/7 al 29/10/2013) fueron estimadas a partir de los valores diarios medidos en un establecimiento vecino distante a aproximadamente 4.500 m de donde se encontraba el ensayo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones Climáticas de la Campaña 2013/2014

Las precipitaciones registradas en el período de barbecho fueron escasas (Tabla 1). Las lluvias acumuladas durante el ciclo (Siembra – Cosecha) alcanzaron

Tabla 1. Precipitaciones registradas en el sitio experimental durante la campaña 2013/2014 ^(*).

Día/Mes	Precipitaciones (mm)									
	2013						2014			
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
1					31			50		
2							10			
3				5						
4										180
5										
6			5		1					50
7										
8				4		21		18		
9	15				36		2		21	
10										
11	2							42		
12										
13				3						
14					5				50	
15				3						
16								12		
17										
18										
19								14		
20				8						
21							12			
22										
23				4						
24										
25					29					Cosecha
26					40					
27				2						
28							65			
29			13	Siembra						
30									2	
31				7						
Totales mensuales	17	0	18	36	142	21	89	136	73	230

(*) Los datos correspondientes al período previo a la siembra del ensayo fueron obtenidos de un establecimiento vecino distante a 4,5 km del sitio experimental.

un total de 698 mm, valor superior a los 400 mm requeridos por el cultivo para lograr niveles óptimos de productividad (Chessa, 2013). No obstante, en el período comprendido entre el 27/11/2013 y el 27/1/2014 (62 días), el total de precipitaciones fue de sólo 45 mm (Tabla 1). Esta etapa de deficiencia hídrica atravesada por el cultivo podría asociarse con el retraso observado en el panojamiento (herramienta adaptativa del cultivo frente a un estrés) en los tratamientos con menores aportes de nutrientes (particularmente, T y PS) en comparación con los que recibieron una fertilización más completa (NPS y, especialmente, NPS + Zn) (Tabla 2).

Tabla 2. Observaciones fenológicas del cultivo de sorgo granífero realizadas el 10/1/2014 en todos los tratamientos y repeticiones.

Tratamiento	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
T	Aún no panojó y no muestra la panoja embuchada	Aún no panojó y no muestra la panoja embuchada	Aún no panojó y no muestra la panoja embuchada	Aún no panojó y no muestra la panoja embuchada
PS	10% de plantas con panoja embuchada	10% de plantas con panoja embuchada	5% de plantas con panoja embuchada	5% de plantas con panoja embuchada
NS	10% de plantas panojadas	10% de plantas panojadas	5% de plantas con panoja embuchada	10% de plantas panojadas
NP	25% de plantas panojadas	25% de plantas panojadas	10% de plantas panojadas	20% de plantas panojadas
NPS	40% de plantas panojadas	20% de plantas panojadas	40% de plantas panojadas	30% de plantas panojadas
NPS + Zn	70% de plantas panojadas	40% de plantas panojadas	70% de plantas panojadas	50% de plantas panojadas

Estas diferencias en el estado de desarrollo ponen de manifiesto la gran adaptabilidad del cultivo de sorgo a diferentes ambientes y frente a un estrés. Además de actuar como una respuesta a la escasez de lluvias, en este ensayo el mecanismo de latencia también se habría activado como resultado de la distinta disponibilidad de nutrientes que experimentó el cultivo.

4.2. Caracterización Edáfica del Sitio Experimental y Disponibilidad Inicial de Nutrientes

Los resultados de los análisis de las muestras de suelo tomadas a la siembra del cultivo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de las condiciones edáficas del sitio experimental y disponibilidad inicial de los nutrientes en evaluación ^(#).

Profundidad (cm)	pH	Materia orgánica (%)	N total (%)	N-NO ₃ ⁻ (mg/kg)	P extractable (mg/kg)	S-SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	Zn (mg/kg)
0-20	6,15	2,66	0,1388	13,8	10,1	8,1	0,78
20-40	-	-	-	1,8	-	6,1	-
40-60	-	-	-	1,1	-	5,4	-

^(#): Valores medios de los 4 bloques.

El pH, la materia orgánica y el N total mostraron valores adecuados para la zona. Las concentraciones de N-NO₃⁻, P extractable (Bray 1), S-SO₄²⁻ y Zn, en cambio, denotaron en general niveles inferiores a los óptimos. La disponibilidad de estos nutrientes es discutida más adelante en conjunto con las respuestas obtenidas al agregado de cada uno de ellos.

4.3. Rendimiento de Grano, Densidad de Panojas y Respuesta a los Distintos Nutrientes

A pesar del período de déficit hídrico mencionado en el punto 4.1., los rendimientos de grano obtenidos fueron relativamente elevados, oscilando los valores medios de los distintos tratamientos entre 7.914 y 9.897 kg/ha (Tabla 4).

El efecto de los tratamientos de fertilización sobre la productividad de grano fue altamente significativo ($p < 0,0001$; ANEXO II). Dentro de los nutrientes evaluados, se registraron respuestas significativas ($p < 0,05$) al N (+714 kg/ha) y al P (+1.562 kg/ha), verificándose sólo una tendencia a incrementar los rendimientos ($p > 0,05$) en el caso del S (+163 kg/ha) y del Zn (+318 kg/ha). La respuesta conjunta al agregado de todos los nutrientes (N, P, S y Zn), obtenida como la diferencia de los rendimientos alcanzados por los tratamientos NPS + Zn y T, fue de +1.983 kg/ha ($p < 0,05$; ANEXO II), lo que refuerza el concepto que una adecuada y balanceada nutrición del cultivo puede efectivamente contribuir a

elegir su productividad y, en consecuencia, también la competitividad frente a otras opciones estivales de producción de grano.

Tabla 4. Valores medios de densidad de panojas y rendimiento de grano de cada tratamiento.

Tratamiento	Densidad de Panojas ⁽⁺⁾ (Nº/m ²)	Rendimiento de Grano ⁽⁺⁾ (kg/ha)
T	24,25	7.914 a
PS	24,25	8.865 b
NS	22,95	8.017 a
NP	23,18	9.416 bc
NPS	22,73	9.579 c
NPS + Zn	25,23	9.897 c

⁽⁺⁾: Dentro de cada columna, la ausencia de letras denota que no hubo efecto de tratamiento, mientras que letras distintas indican diferencias significativas (DMS; $p < 0,05$).

La densidad de panojas no fue afectada por los tratamientos ($p > 0,05$; Tabla 4 y ANEXO II). Los valores de esta variable oscilaron dentro de un rango muy estrecho (22,73 a 25,23 panojas/m²) y no mostraron asociación con el nivel de rendimiento alcanzado (Figura 3). Esto indicaría que el tamaño de las panojas, el número de granos/m² y/o el peso unitario de los mismos, habrían sido componentes del rendimiento más relevantes en la determinación de la productividad de grano obtenida con los distintos tratamientos comparados. Dichos atributos, sin embargo, no pudieron ser evaluados en el presente estudio.

4.4. Respuesta al Nitrógeno y Herramientas de Diagnóstico Evaluadas

A partir de las concentraciones de N-NO₃⁻ para cada profundidad de suelo detalladas en la Tabla 3, se determinó la dotación de N en el suelo (Ns; 0-60 cm), expresada en kg N/ha, sobre la base de la densidad aparente de cada capa de 20 cm de espesor. De acuerdo a la textura franco arenosa el suelo del sitio experimental (serie Norumbega; INTA, 2013) en todo su perfil, y sobre la base de la experiencia zonal (M. Ferrari, comunicación personal), se estimaron valores de densidad aparente de 1,30 g/cm³ para la profundidad 0-20 cm, y de 1,35 g/cm³ para los espesores 20-40 y 40-60 cm.

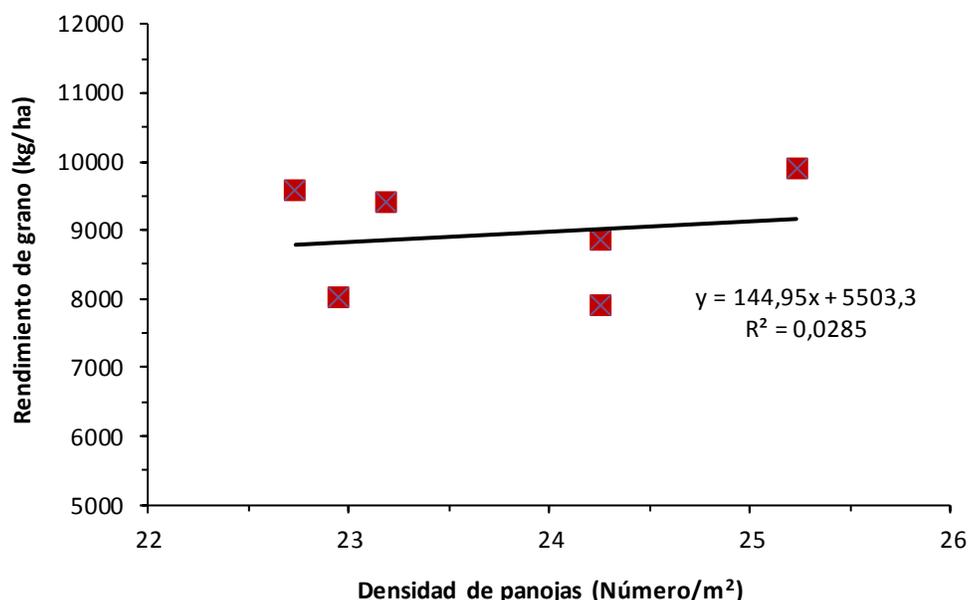


Figura 3. Relación entre el rendimiento de grano y la densidad de panojas para los tratamientos ensayados.

El N disponible (kg N/ha) para cada espesor de suelo fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$N \text{ disponible (kg N/ha)} = N\text{-NO}_3^- \text{ (mg/kg)} \times \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)} \times \text{Espesor de la capa de suelo (dm)}$$

La dotación de N en el suelo (Ns) a 0-60 cm de profundidad fue luego obtenida mediante la suma del N disponible de cada capa de 20 cm (Tabla 5).

Tabla 5. Dotación de N en el suelo (Ns; 0-60 cm) promedio de los 4 bloques.

Profundidad (cm)	N-NO ₃ ⁻ (mg/kg)	Densidad aparente (g/cm ³)	Espesor de la capa de suelo (dm)	N disponible (kg/ha)
0-20	13,8	1,30	2	35,88
20-40	1,8	1,35	2	4,86
40-60	1,1	1,35	2	2,97
Dotación de N en el suelo (Ns; 0-60 cm):				43,71

El valor de Ns determinado es considerablemente inferior al rango crítico de 114-174 kg N/ha (valor medio: 144 kg N/ha) propuesto tentativamente por Ferrari *et al.* (2012) para el cultivo en la zona de Pergamino (Provincia de Buenos Aires), al umbral de 130 kg N/ha reportado por Fontanetto *et al.* (2008, 2010) para el área

central de Santa Fe, y al nivel crítico de 154 kg N/ha obtenido por Barbagelata *et al.* (2014) para diferentes ambientes de la Provincia de Entre Ríos. Sobre la base de estos antecedentes, era esperable encontrar una respuesta marcada al N como la que luego fue registrada en este ensayo.

Las concentraciones de N-NO_3^- en el suelo a 0-30 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo (7-8 hojas expandidas) mostraron valores muy contrastantes y significativamente diferentes entre sí ($p < 0,05$; Figura 4 y ANEXO II).

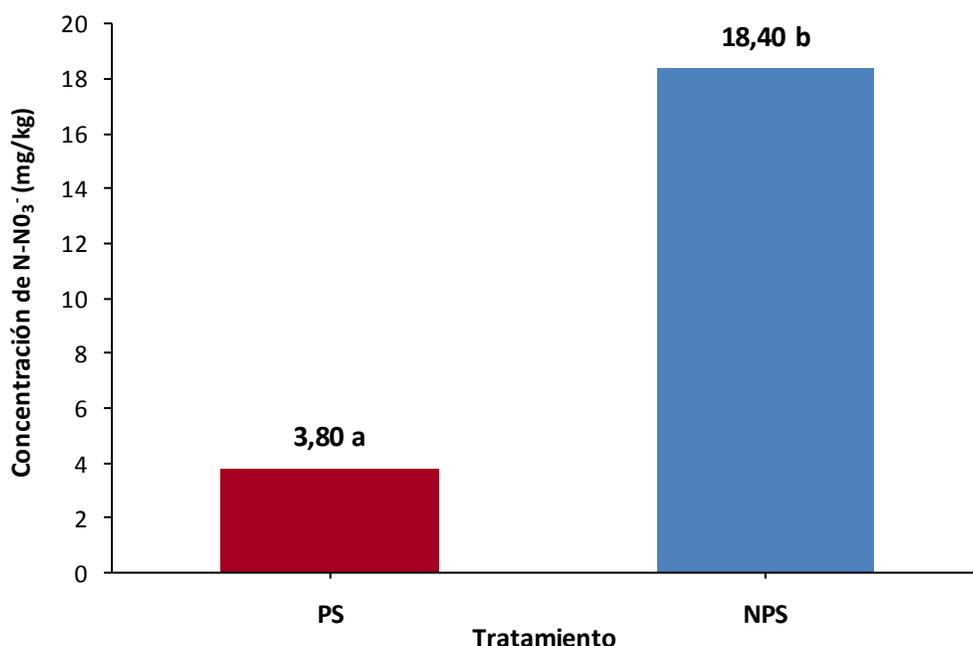


Figura 4. Concentraciones medias de N-NO_3^- en el suelo (0-30 cm de profundidad) en los tratamientos PS y NPS con el cultivo en 7-8 hojas expandidas. Valores seguidos de letras distintas indican diferencias significativas (DMS; $p < 0,05$).

La concentración media de N-NO_3^- determinada en el tratamiento PS es sensiblemente menor al rango crítico de 15,0-18,4 mg/kg (valor medio: 16,7 mg/kg) encontrado para sorgo granífero en el área de Pergamino (Provincia de Buenos Aires) por Ferrari *et al.* (2012). También en este caso, dicha información anticipaba una alta probabilidad de respuesta al N, tal como posteriormente se verificó a la cosecha del ensayo. El valor de 3,80 mg /kg hallado en el tratamiento PS es también inferior al rango crítico de 13-20 mg N-NO_3^- /kg que surge del trabajo de Harreguy *et al.* (2012), desarrollado a partir de muestras de suelo tomadas previo al estado de 6 hojas expandidas del cultivo de sorgo en una red de

9 ensayos conducidos en Uruguay. Asimismo, la concentración de N-NO_3^- del tratamiento PS se ubica por debajo del nivel crítico de $20 \text{ mg N-NO}_3^-/\text{kg}$ obtenido por Ferrari *et al.* (2001) en el centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe para el cultivo de maíz de siembra temprana en el estado V5-6.

Por el contrario, el valor medio de N-NO_3^- medido en el tratamiento NPS ($18,40 \text{ mg/kg}$) se encuentra comprendido dentro de los rangos críticos para sorgo granífero anteriormente mencionados, lo que sugiere que el cultivo en estas parcelas no habría experimentado deficiencias de N.

Las determinaciones de IV realizadas con el clorofilómetro durante el ciclo del cultivo en las parcelas de los tratamientos PS y NPS, mostraron un patrón diferente en los dos estados fenológicos en que fueron efectuadas. Así, en el estado de 7-8 hojas desplegadas, los valores medios de IV fueron relativamente similares en los tratamientos PS y NPS, y no difirieron estadísticamente entre sí ($p>0,05$; Figura 5a y ANEXO II). En cambio, las lecturas tomadas con el cultivo en 10 hojas expandidas, presentaron una diferencia mayor y significativa ($p<0,05$) entre PS y NPS (Figura 5b y ANEXO II), lo que permitió detectar en forma certera el distinto estatus nitrogenado del cultivo en ambos tratamientos.

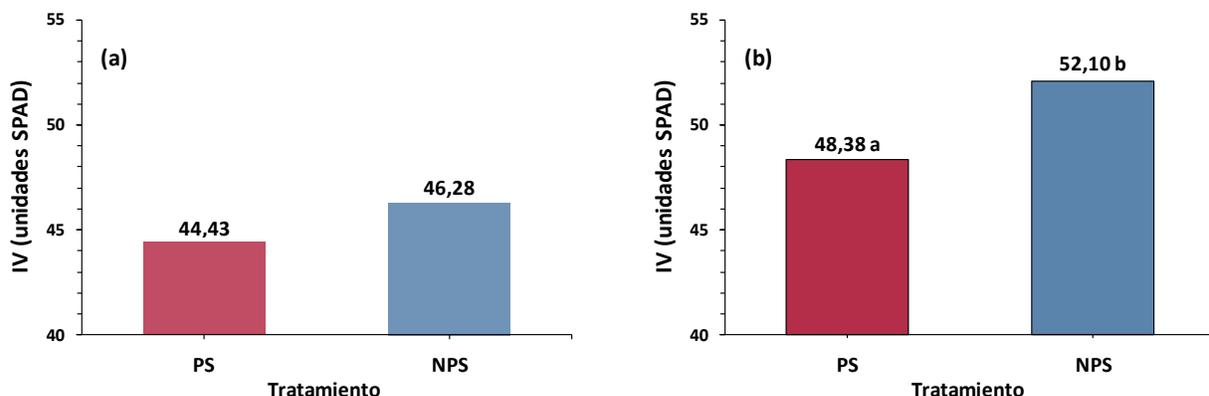


Figura 5. Valores medios de Índice de Verdor (IV) determinados en los tratamientos PS y NPS en dos estados fenológicos del cultivo: (a) 7-8 hojas expandidas, (b) 10 hojas expandidas. Para cada estado, la ausencia de letras denota que no hubo efecto de tratamiento, mientras que valores seguidos de letras distintas indican diferencias significativas (DMS; $p<0,05$).

Aparte del incremento en las diferencias entre tratamientos que se verificó a medida que avanzó el ciclo del cultivo (en la primera medición, los valores de IV de PS y NPS difirieron en 1,85 unidades SPAD, mientras que en la segunda

medición la diferencia entre ambos se expandió a 3,72 unidades SPAD), también merece destacarse el importante aumento que se observó en los valores medios de IV de cada tratamiento en el período de sólo 9 días que transcurrió entre las dos mediciones. Durante dicho lapso, en el tratamiento PS el IV se incrementó de 44,43 a 48,38 (+3,95 unidades SPAD) y en el tratamiento NPS los valores pasaron de 46,28 a 52,10 (+5,82 unidades SPAD). El mayor crecimiento del IV registrado en las parcelas NPS sería consecuencia de la más elevada acumulación de clorofila en las hojas motivada por la superior disponibilidad de N-NO_3^- en el suelo que tuvieron las plantas de sorgo en ese tratamiento.

El aumento de la sensibilidad hacia estadios más avanzados del cultivo que presentó el IV para reflejar diferentes condiciones de nutrición nitrogenada, había sido ya observado por Ferrari *et al.* (2012), quienes, sobre la base de dichos hallazgos, señalaron la conveniencia de emplear esta herramienta de diagnóstico en el estado de 9-10 hojas en lugar del más temprano de 6-7 hojas desplegadas.

En el presente estudio, el valor medio de IV obtenido en el estado de 7-8 hojas para el tratamiento PS (44,43 unidades SPAD) fue levemente superior al nivel crítico tentativo de 43,1 unidades SPAD reportado por Ferrari *et al.* (2012) para el cultivo en 6-7 hojas expandidas, mientras que el IV medio del tratamiento NPS (46,28 unidades SPAD) superó al nivel crítico mencionado con una mayor amplitud. Para las lecturas tomadas en 10 hojas expandidas, los valores medios de PS (48,38 unidades SPAD) y de NPS (52,10 unidades SPAD) se ubicaron por debajo y por encima, respectivamente, del nivel crítico preliminar propuesto por Ferrari *et al.* (2012) para el cultivo en el estado de 9-10 hojas (50,3 unidades SPAD).

La efectividad que en este trabajo mostró el método del IV para distinguir cultivos con diferente nivel de nutrición nitrogenada no fue observada por Barraco *et al.* (2016) en ensayos realizados en General Villegas (Provincia de Buenos Aires). En dicho estudio, las mediciones de IV realizadas durante el ciclo del sorgo (en los estados de 6-7, 8-9, y 11-12 hojas desplegadas) no presentaron resultados consistentes con los tratamientos de fertilización nitrogenada comparados (0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg N/ha) ni tampoco con las etapas del cultivo en las que se tomaron las lecturas, aún cuando se registraron incrementos en la producción de granos por el agregado de N. Así, en uno de los experimentos el método reveló diferencias entre tratamientos de N en el estado de 7 hojas, pero no cuando el cultivo estaba con 9 y 12 hojas desarrolladas, mientras que en otro ensayo se obtuvieron diferentes valores de IV para distintas dosis de N con el cultivo en 11 hojas expandidas, pero no así cuando éste presentaba 6 u 8 hojas. Debido al comportamiento descrito, los autores concluyeron que el empleo de esta

herramienta resultó de poca utilidad para evaluar apropiadamente la condición de nutrición nitrogenada del cultivo. Contrariamente, en dos experimentos conducidos por Zamora *et al.* (2016) en el centro-sur bonaerense, en los cuales se compararon las mismas dosis de N (0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg N/ha), las mediciones de IV realizadas con el cultivo en 6 hojas desarrolladas mostraron diferencias significativas y muy marcadas (de hasta 8,5 y 11,8 unidades SPAD para uno y otro ensayo, respectivamente) entre tratamientos de fertilización.

4.5. Respuesta al Fósforo y Nivel del Nutriente en el Suelo

El valor medio de P extractable determinado a la siembra (10,1 mg/kg; Tabla 3) se encuentra cercano al límite entre las clases de alta probabilidad de respuesta (5-10 mg/kg) y de respuesta condicionada por otros factores de manejo (10-20 mg/kg) de la escala de Salas y Lovera (1997) para sorgo granífero. Asimismo, la concentración del nutriente en el ensayo se ubica por debajo del nivel crítico de 16 mg/kg de P extractable (Bray 1) establecido por García Lamothe y Quincke (2008) a partir de experiencias desarrolladas en Uruguay, y también es inferior al umbral de 15 mg/kg sugerido por la Universidad de Nebraska, Estados Unidos (Wortmann *et al.* (2013) para basar las recomendaciones de fertilización fosfatada del cultivo de sorgo en su área de influencia.

Sobre la base de los trabajos anteriores, era entonces predecible que con el nivel de P que tenía el suelo del sitio experimental el agregado de este nutriente produjera el impacto positivo en el rendimiento de grano que luego se verificó.

4.6. Respuesta al Azufre y Disponibilidad del Nutriente en el Suelo

Las concentraciones medias de S-SO₄²⁻ en el suelo a la siembra fueron de 8,1; 6,1; y 5,4 mg/kg en los espesores 0-20, 20-40 y 40-60 cm, respectivamente (Tabla 3). La escasa tendencia a incrementar el rendimiento de grano por la aplicación de S que se observó en el ensayo (+163 kg/ha; p>0,05) podría estar asociada a la relativamente buena disponibilidad inicial del nutriente que presentaba el suelo, en particular en la capa superficial (0-20 cm). Sin embargo, en trabajos publicados no sólo en Argentina (Melin y Zamora, 2007) sino también en otros países con tradición en la producción de sorgo granífero, como Estados Unidos (Whitney, 1998), se ha señalado la baja capacidad que muestran los análisis de suelo como único indicador para detectar deficiencias del nutriente y que, por lo tanto, resultan ser muy pobres predictores de la respuesta a la fertilización azufrada. Por este motivo, es conveniente que al realizar el

diagnóstico de los requerimientos del nutriente se incluya también una caracterización del ambiente en el que se va a implantar el cultivo. Así, propiedades del suelo como bajos contenidos de materia orgánica y texturas arenosas aumentarían la probabilidad de que el nutriente se encuentre en deficiencia. Contrariamente, algunos aspectos de manejo, como el riego con agua que contenga altas concentraciones de S, disminuirían la chance de que el cultivo responda a la fertilización con este nutriente.

Recientemente, Wortmann *et al.* (2013) propusieron para los suelos arenosos irrigados del estado de Nebraska (Estados Unidos) un esquema de recomendación de fertilización azufrada de sorgo granífero que considera los contenidos de $S-SO_4^{2-}$ y de materia orgánica del suelo, la concentración de $S-SO_4^{2-}$ en el agua de riego, y la localización del fertilizante a emplear (al voleo o en la línea de siembra). Para todas las combinaciones de niveles de materia orgánica, contenidos de $S-SO_4^{2-}$ en el agua y localizaciones de la fuente azufrada, el esquema recomienda no fertilizar cuando la concentración de $S-SO_4^{2-}$ en el suelo es superior a 8 mg/kg. Si este modelo de decisión fuera aplicable a las condiciones bajo las cuales se condujo el ensayo del presente estudio, habría estado en consonancia con la muy escasa respuesta al S que se encontró aplicando el yeso agrícola al voleo, en un suelo franco arenoso, y con una disponibilidad de $S-SO_4^{2-}$ en el suelo (0-20 cm) de 8,1 mg/kg.

4.7. Respuesta al Zinc y Dotación del Nutriente en el Suelo

En promedio para los cuatro bloques del ensayo, la concentración de Zn en la capa de 0-20 cm del suelo fue de 0,78 mg/kg (Tabla 3). Este valor se encuentra dentro del rango de disponibilidad media del nutriente (0,5-1,0 mg/kg de Zn-DTPA) establecido por Whitney (1998) para sorgo granífero de secano en el área de influencia de la Universidad Estatal de Kansas (Estados Unidos), y levemente por debajo del límite superior del nivel medio de disponibilidad (0,4-0,8 mg/kg de Zn-DTPA) sugerido por la Universidad de Nebraska (Estados Unidos) para basar las recomendaciones de fertilización con este elemento (Wortmann *et al.*, 2013). Si bien no se trata de trabajos locales, la información de ambos contribuiría a explicar el motivo por el cual en la presente investigación sólo se registró una tendencia discreta a aumentar el rendimiento de grano (+318 kg/ha; $p>0,05$) cuando el cultivo se fertilizó con Zn.

En Argentina no se dispone de una calibración de la respuesta del sorgo granífero a la fertilización con Zn en función de la concentración de este micronutriente en el suelo, pero esta herramienta sí ha sido desarrollada

exitosamente para maíz. Para este cultivo, se ha establecido un nivel crítico de 1,0 mg/kg de Zn-DTPA en el espesor 0-20 cm del suelo que permite predecir adecuadamente la probabilidad de respuesta al agregado del nutriente (Barbieri *et al.*, 2015).

De acuerdo con Wortmann *et al.* (2013), la deficiencia de Zn es menos frecuente en sorgo granífero que en maíz, y puede presentarse en sitios donde el subsuelo se encuentra expuesto por decapitación de la capa superficial, en suelos calcáreos con bajos niveles de materia orgánica, en suelos arenosos, o en situaciones en donde se ha producido un descenso marcado de las poblaciones de micorrizas (hongos que contribuyen activamente a abastecer de P y Zn a las raíces), como por ejemplo después de una inundación. De todos estos factores predisponentes a la deficiencia de Zn, en el presente estudio solamente se cumplió parcialmente con la condición de suelo arenoso (la serie Norumbega posee textura franco arenosa en todo su perfil; INTA, 2013).

5. CONCLUSIONES

- La fertilización del cultivo de sorgo granífero con N, P, S y Zn en conjunto aumentó considerablemente (+25%) el rendimiento de grano. Individualmente, las aplicaciones de P y N, en ese orden, generaron las mayores respuestas productivas, mientras que el agregado de S y Zn mostraron sólo una tendencia a incrementar los rendimientos. Estos resultados permiten aceptar parcialmente la primera de las hipótesis planteadas en el presente trabajo.
- La respuesta a N mostró una clara asociación tanto con la dotación del nutriente en el suelo (0-60 cm) a la siembra, como con la concentración de N-nitratos en el suelo (0-30 cm) determinada cuando el cultivo presentaba 7-8 hojas desplegadas. Así, los bajos valores medidos para ambos indicadores permitieron predecir eficazmente el aumento de rendimiento debido al agregado de N. Las determinaciones del Índice de Verdor con un clorofilómetro portátil también demostraron ser útiles para anticipar correctamente la respuesta a este nutriente, especialmente cuando las mismas fueron realizadas en una etapa más avanzada del cultivo (10 hojas expandidas).
- El nivel de P extractable en el suelo (0-20 cm) a la siembra fue una herramienta efectiva para diagnosticar las deficiencias de este nutriente, sobre cuya base pudo predecirse adecuadamente la respuesta a la fertilización fosfatada.
- La tendencia a aumentar levemente el rendimiento de grano producida por la aplicación de S mostró una cierta asociación con la disponibilidad inicial del nutriente en la capa superficial del suelo (0-20 cm). Sin embargo, esta relación debería ser más y mejor investigada, incluyendo también en el diagnóstico variables de sitio y de manejo del cultivo que posibiliten robustecer la predicción de la respuesta al nutriente.
- La concentración de Zn en el suelo (0-20 cm) aparentó ser un buen instrumento de diagnóstico para inferir el discreto efecto positivo sobre el rendimiento de grano que generó el agregado de este micronutriente. No obstante, sería necesario realizar un mayor número de experimentos a fines de validar para las condiciones del noroeste bonaerense el nivel o rango crítico de Zn en el suelo para el cultivo de sorgo granífero. Sobre la base de ésta y de las tres conclusiones anteriores, se acepta en forma parcial la segunda hipótesis de este estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

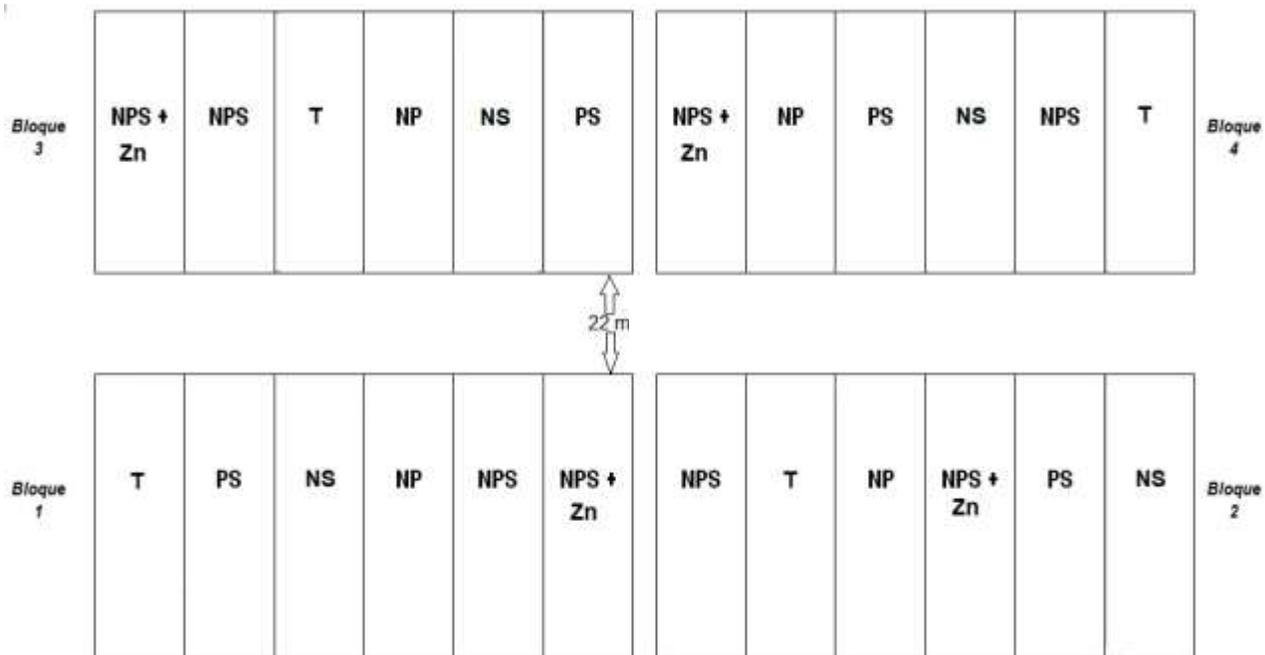
- Barbagelata, P.A.; J.M. Pautasso y R.J.M. Melchiori, 2014. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada para sorgo en Entre Ríos. *En: Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas"*, 5 p. Bahía Blanca, mayo de 2014. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).
- Barbieri, P.A.; H.R. Sainz Rozas; H. E. Echeverría; F. Salvagiotti; P. Barbagelata; M. Barraco; J.C. Colazo; G. Ferraris; H.S. Sánchez; R.H. Cáceres Díaz; N.I. Reussi Calvo; G. Espósito; M. Eyherabide y B. Larsen, 2015. ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de cinc en el cultivo de maíz? *En: Simposio Fertilidad 2015*, pp. 203-207. Rosario, mayo de 2015. International Plant Nutrition Institute-Fertilizar Asociación Civil.
- Barraco, M.; P. Girón; A. Lardone y W. Miranda, 2016. Dosis y momentos de aplicación de nitrógeno en sorgo granífero. *En: Memoria Técnica 2014-2015*, pp. 49-53. INTA, EEA General Villegas.
- Chessa, A., 2012. El sorgo, un cultivo perfecto. Agromercado, Cuadernillo Clásico de Sorgo, N° 172, pp. 4-7.
- Chessa A. 2013. Beneficios de incluir el sorgo en la rotación. Agromercado, Cuadernillo Clásico de Sorgo, N° 178, pp. 2-7.
- 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* N° 11. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 33: 13-16.
- Ciarlo, E.; F. Lagrassa; F. Missart y E. Arévalo, 2013. Fertilización a la semilla y foliar con zinc en maíz. Resultados de ensayos a campo. *Fertilizar*, 27:4-5.
- 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, noviembre de 2010. Asociación de Ingenieros Agrónomos de la Zona Norte de la Provincia de Buenos Aires (AIANBA).
- FAO, 2019. FAOSTAT. Datos. Producción.Cultivos. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize> (Consultado: Julio 2019).
- Ferrari, M.C., 2016. Aportes del sorgo a la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola. *En: Actas III Simposio Nacional y I Conferencia Internacional de Sorgo*, 5 p. Pergamino, agosto de 2016. Asociación de Ingenieros Agrónomos de la Zona Norte de la Provincia de Buenos Aires (AIANBA) - INTA - Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA).
- 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).

- Ferrari, M.; L.A. Rivoltella y J.M. Casado, 2012. Diagnóstico de fertilidad y estrategias de la fertilización nitrogenada en sorgo granífero. *En: Actas XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 6 p. Mar del Plata, abril de 2012. Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo (SLCS) - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).
- Ferraris, G.N.; M. Barraco; L. Ventimiglia; L. Couretot y F. Mousegne, 2013. Fertilización en sorgo en el norte y centro-oeste de Buenos Aires. Rendimiento y eficiencia comparada al maíz. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 12:19-22.
- Ferraris, G.N.; L.A. Couretot; G. González Anta y G. Magnone, 2012. Tratamientos de semilla con microorganismos promotores de crecimiento (PGPM) y micronutrientes en sorgo *Sorghum bicolor* (Linn.). Efectos sobre el crecimiento y la productividad. *En: Actas Segundo Simposio Nacional de Sorgo*, 5 p. Pergamino, agosto de 2012. Asociación de Ingenieros Agrónomos de la Zona Norte de la Provincia de Buenos Aires (AIANBA).
- Fertilizar Asociación Civil, 2014. Consumo de fertilizantes - Campaña 2013/2014: Total país. Disponible en: <http://www.fertilizar.org.ar/subida/Estadistica/Detalle%20de%20Consumo%20de%20Fertilizantes%20Extensivos/Consumo%20Fertilizantes%20Campa%C3%B1a%202013-2014.pdf> (Consultado: Julio 2015).
- 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*, N° 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 Lamothe, A. y A. Quincke, 2008. Fertilización de sorgo. Disponible en: http://www.inia.org.uy/estaciones/tres/actividades/2008/aquincke_presentacion.pdf (Consultado: Agosto 2020).
- Harreguy, P.; O. Casanova y A. Cerveñansky, 2012. Ajuste de la fertilización nitrogenada en sorgo granífero. *En: Actas XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 6 p. Mar del Plata, abril de 2012. Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo (SLCS) - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).
- InfoStat, 2018. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INTA, 2013. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3563-24 Roberts. INTA, Instituto de suelos, CIRN Castelar. Disponible en: <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3563/Roberts/index.htm> (Consultado: Junio 2013).
- Melin, A.A. y M. Zamora, 2007. Tecnología del cultivo. *En: Sorgo en el sur* (M.S. Zamora y A.A. Melin, eds.), pp. 16-20. Ediciones INTA-Ministerio de Asuntos Agrarios Gobierno de la Provincia de Buenos Aires.
- Mieres, L. y L. Royo, 2015. Fertilización nitrogenada en sorgo de primera. *Revista Voces y Ecos* N° 33, pp. 46-48.

- Salas, H.P. y E. Lovera, 1997. Fertilización. *En: Sorgo granífero* (L.M. Giorda, ed.), pp. 20-23. Cuaderno de actualización técnica N° 7, INTA, EEA Manfredi.
- Secretaría de Agroindustria, 2019. Datos Agroindustriales/Dataset. Estimaciones agrícolas. Disponible en: <http://www.datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Consultado: Julio 2019).
- Whitney, D., 1998. Fertilizer requirements. *En: Grain Sorghum Production Handbook*, pp. 12-14. Kansas State University, Manhattan, USA.
- Wortmann, C.S.; R.B. Ferguson; G.W. Hergert; C.A. Shapiro y T. Shaver, 2013. Nutrient management suggestions for grain sorghum. NebGuide G1669, University of Nebraska, Lincoln, USA, 4 p.
- Zamora, M.S.; J.I. Massigoge y A.A. Melin, 2016. Fertilización nitrogenada de sorgo granífero en suelos con limitantes del centro-sur bonaerense. *En: Actas III Simposio Nacional y I Conferencia Internacional de Sorgo*, 4 p. Pergamino, agosto de 2016. Asociación de Ingenieros Agrónomos de la Zona Norte de la Provincia de Buenos Aires (AIANBA) - INTA - Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA).
- 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, noviembre de 2010. Asociación de Ingenieros Agrónomos de la Zona Norte de la Provincia de Buenos Aires (AIANBA).
- Zamora M.; A. Melín A.; D. Intaschi; N. Carrasco y S. Balda, 2011. Fertilización de sorgo granífero en el sudeste bonaerense. Agromercado, Cuadernillo Clásico de Sorgo, N° 166, pp. 20-22.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I: Plano de Campo del Ensayo



→ Tamaño de las parcelas: 3,15 m (6 surcos a 52,5 cm) de ancho x 20 m de largo

7.2. ANEXO II: Análisis Estadístico de los Resultados

▪ Densidad de Panojas

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Panojas/m ²	24	0,41	0,10	9,22

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	50,43	8	6,30	1,31	0,3082
Tratamiento	18,78	5	3,76	0,78	0,5772
Bloque	31,65	3	10,55	2,20	0,1304
Error	71,92	15	4,79		
Total	122,36	23			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,30030

Error: 4,7950 gl: 15

Tratamiento	Medias	n	E.E.
NPS	22,73	4	1,09 A
NS	22,95	4	1,09 A
NP	23,18	4	1,09 A
PS	24,25	4	1,09 A
T	24,25	4	1,09 A
NPS+Zn	25,23	4	1,09 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=2,69468

Error: 4,7950 gl: 15

Bloque	Medias	n	E.E.
3	21,92	6	0,89 A
4	23,73	6	0,89 A B
2	24,47	6	0,89 A B
1	24,93	6	0,89 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

▪ Rendimiento de Grano

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento	24	0,88	0,81	4,58

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	17986885,17	8	2248360,65	13,39	<0,0001
Tratamiento	13843524,83	5	2768704,97	16,49	<0,0001
Bloque	4143360,33	3	1381120,11	8,23	0,0018
Error	2518402,17	15	167893,48		
Total	20505287,33	23			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=617,55673

Error: 167893,4778 gl: 15

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
T	7913,75	4	204,87	A	
NS	8017,00	4	204,87	A	
PS	8864,50	4	204,87	B	
NP	9415,50	4	204,87	B	C
NPS	9579,50	4	204,87		C
NPS+Zn	9896,75	4	204,87		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=504,23296

Error: 167893,4778 gl: 15

Bloque	Medias	n	E.E.		
4	8332,83	6	167,28	A	
3	8910,33	6	167,28	B	
2	9052,67	6	167,28	B	C
1	9495,50	6	167,28		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

▪ **Concentración de N-NO₃⁻ en el suelo en 7-8 hojas desplegadas**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N-NO3 0-30 cm	8	0,97	0,92	20,86

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	459,75	4	114,94	21,43	0,0152
Tratamiento	426,32	1	426,32	79,49	0,0030
Bloque	33,43	3	11,14	2,08	0,2817
Error	16,09	3	5,36		
Total	475,84	7			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=5,21151

Error: 5,3633 gl: 3

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
PS	3,80	4	1,16	A
NPS	18,40	4	1,16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=7,37019

Error: 5,3633 gl: 3

Bloque	Medias	n	E.E.	
2	9,20	2	1,64	A
1	10,30	2	1,64	A
4	10,35	2	1,64	A
3	14,55	2	1,64	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

▪ **Índice de Verdor en 7-8 hojas desplegadas**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Índice Verdor 7-8	8	0,59	0,03	3,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7,85	4	1,96	1,06	0,5001
Tratamiento	6,85	1	6,85	3,71	0,1497
Bloque	1,00	3	0,33	0,18	0,9032
Error	5,54	3	1,85		
Total	13,38	7			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,05664

Error: 1,8450 gl: 3

Tratamiento Medias n E.E.

PS 44,43 4 0,68 A

NPS 46,28 4 0,68 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=4,32274

Error: 1,8450 gl: 3

Bloque Medias n E.E.

1 45,05 2 0,96 A

4 45,15 2 0,96 A

3 45,25 2 0,96 A

2 45,95 2 0,96 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

▪ **Índice de Verdor en 10 hojas desplegadas**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Índice Verdor 10	8	0,99	0,97	0,68

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	31,25	4	7,81	66,24	0,0029
Tratamiento	27,75	1	27,75	235,35	0,0006
Bloque	3,49	3	1,16	9,88	0,0460
Error	0,35	3	0,12		
Total	31,60	7			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,77274

Error: 0,1179 gl: 3

Tratamiento Medias n E.E.

PS 48,38 4 0,17 A

NPS 52,10 4 0,17 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,09282

Error: 0,1179 gl: 3

Bloque Medias n E.E.

4	49,25	2	0,24	A
3	50,20	2	0,24	A B
1	50,40	2	0,24	B
2	51,10	2	0,24	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)