



“Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO
XXIII CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012
contribuciones@congresodesuelos.org.ar

OFERTA HÍDRICA Y RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN EN MAÍZ, TRIGO Y SOJA EN EL NORTE DE LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA

Correndo, A.A.^{1,*}; Boxler, M.² y García, F.O.¹

¹ IPNI Cono Sur, Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires, Argentina; ² Región CREA Sur de Santa Fe.

*Autor de contacto: acorrendo@ipni.net. Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 54 11 47989939

RESÚMEN

El recurso agua es el más limitante en los sistemas productivos pampeanos y su aprovechamiento resulta clave en los planteos y alternativas de manejo agronómico de los cultivos. La fertilización puede ser una herramienta decisiva a la hora de mejorar dicho aprovechamiento. Los objetivos del trabajo fueron: i) determinar las eficiencias de uso de agua (EUA) bajo distintos tratamientos de fertilización; y ii) evaluar las relaciones entre los rendimientos y las respuestas a la fertilización con el agua total del suelo (AT) a la siembra y a floración, y las precipitaciones en cultivos de maíz, trigo y soja. Se analizó información proveniente de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe en el período 2000/1-2010/1. En todos los cultivos, la EUA promedio fue mayor en los tratamientos de fertilización balanceada con nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). En el caso del trigo, las respuestas a P y S disminuyeron con el aumento de las precipitaciones durante el ciclo, mientras que para N, las respuestas se incrementaron con el nivel de AT a la siembra cuando el cultivo antecesor fue maíz. En soja de primera, las respuestas a P y S se asociaron negativamente con las precipitaciones del ciclo, no siendo así para soja de segunda. Para el caso de maíz, las respuestas a nutrientes no guardaron relación con las variables de oferta de agua analizadas. Este tipo de información resulta útil en la comprensión de las interacciones entre la nutrición de cultivos y el aprovechamiento del recurso agua.

PALABRAS CLAVE

Agua; nutrición; rotación.

INTRODUCCIÓN

El análisis de la productividad debe considerar todos los recursos y factores de producción involucrados. El rendimiento de los cultivos de grano depende de la captura de recursos a lo largo del ciclo. Por tratarse de sistemas productivos de secano, el agua es el recurso limitante por excelencia en los modelos de producción de la región pampeana argentina. La estrategia para la producción de cada cultivo en cada ambiente consistirá entonces en equilibrar la oferta y la demanda de recursos, principalmente durante los períodos críticos, ya sea considerando la maximización del rendimiento de un cultivo en particular o del sistema de producción (Otegui, 2009). Aspectos como la EUA, condicionados por el régimen hídrico de los suelos, deben ser especialmente considerados al planificar el sistema de productivo en diferentes escalas (Quiroga, 2011). El factor nutricional y su manejo balanceado toman especial relevancia en el aprovechamiento del recurso agua por parte de los cultivos (Stewart, 2001; Álvarez *et al.*, 2008). Los objetivos del trabajo fueron: i) determinar las eficiencias de uso de agua (EUA) bajo distintos tratamientos de fertilización; y ii) evaluar las relaciones entre los rendimientos y las respuestas a la fertilización con el agua total del suelo (AT) a la siembra y a floración, y las precipitaciones en cultivos de maíz, trigo y soja, en ensayos de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe.

MATERIALES Y MÉTODOS

En campos de la Región CREA Sur de Santa Fe se realizan estudios de los efectos de la fertilización de largo plazo desde la campaña agrícola 2000/01 (García *et al.*, 2010). Esta red experimental se estableció con once ensayos en campos de agricultores bajo sistemas de siembra directa estabilizados, bajo dos rotaciones maíz-trigo/soja (M-T/S) (5 sitios) y maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S) (6 sitios). El período evaluado estuvo comprendido entre las campañas agrícolas 2000/01 y 2010/11. Mayor información acerca del diseño experimental, condiciones de sitio y resultados de los primeros diez años se pueden consultar en García *et al.* (2010). Brevemente, todos los ensayos incluyen 5 tratamientos: Testigo, PS, NS, NP, y NPS (Tabla 1). Los tratamientos se realizan anualmente siempre sobre las mismas parcelas. En el caso de N, solo se fertilizaron trigo y maíz. En el caso de soja de segunda, las dosis correspondientes fueron aplicadas sobre el cultivo de trigo antecesor. Las precipitaciones registradas durante los ciclos de los cultivos pueden observarse en la Tabla 2. Las determinaciones de AT a la siembra y a floración, se realizaron hasta 100 cm de profundidad o en su defecto hasta donde era posible el muestreo (0-60 cm). Los análisis estadísticos descriptivos, ANVA y regresiones se realizaron mediante el paquete estadístico Infostat (Infostat, 2009).

Tabla 1. Rangos de dosis de nutrientes aplicadas a los cultivos anualmente en los seis tratamientos establecidos en los sitios experimentales. Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2010/11.

| Tratamiento | Testigo | PS | NS | NP | NPS |
|---|---------|-------|--------|--------|--------|
| -----Nutrientes (kg ha ⁻¹)----- | | | | | |
| N | - | 10-20 | 90-175 | 90-175 | 90-175 |
| P | - | 20-46 | - | 20-46 | 20-46 |
| S | - | 17-25 | 17-25 | - | 17-25 |

Tabla 2. Precipitaciones promedio (mm), mediana, mínimo y máximo registrados durante los ciclos de los cultivos de la Red de ensayos de nutrición en la región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2010/11.

| CULTIVO | M-T/S | | | | M-S-T/S | | | |
|-----------------|----------|---------|------|------|----------|---------|------|------|
| | Promedio | Mediana | Min. | Máx. | Promedio | Mediana | Min. | Máx. |
| Maíz | 813 | 870 | 399 | 1119 | 768 | 818 | 382 | 1230 |
| Trigo | 362 | 356 | 131 | 679 | 342 | 332 | 119 | 583 |
| Soja 1ra | - | - | - | - | 523 | 544 | 189 | 723 |
| Soja 2da | 459 | 442 | 284 | 758 | 602 | 516 | 251 | 1139 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia de uso de agua

Habitualmente, el término eficiencia hace referencia a la cantidad de materia seca o grano obtenido por unidad de recurso limitante, en este caso el agua (Dardanelli *et al.*, 2005). En este trabajo, el concepto de EUA (kg mm⁻¹) se expresó como el cociente entre los rendimientos en grano de los cultivos (kg ha⁻¹) y las precipitaciones registradas durante el ciclo de crecimiento de los mismos (mm). Las EUA correspondientes a los ensayos se presentan en la Tabla 3.

En ambas rotaciones, los cultivos de maíz lograron EUAs promedio estadísticamente superiores con el tratamiento NPS respecto del Testigo absoluto. Por otro lado, si bien no se observaron diferencias significativas entre las distintas combinaciones de N, P y S, las tendencias indican un mayor peso del N sobre la EUA, comparado con los demás nutrientes. En el caso del cultivo de trigo, las mayores EUAs se lograron en la rotación M-T/S, con el siguiente orden decreciente: NPS, NP, PS, NS, Testigo. En este caso, se destaca el impacto de la nutrición con P, seguido de N y S, sobre de la EUA. En la misma rotación M-T/S, la soja de segunda mostró EUAs superiores en el tratamiento NPS respecto del Testigo, siendo P el nutriente que presenta una tendencia de mayor peso respecto a S y N. Si bien considerando las tendencias en EUA promedio (Tabla 3) y analizando cada sitio-año por separado se observan diferencias a favor de la fertilización NPS (datos no mostrados), la alta variación interanual y la diferencia entre sitios, no permitieron observar diferencias estadísticamente

significativas entre tratamientos para los cultivos de trigo, soja de primera y soja de segunda en la rotación M-S-T/S (Tabla 3).

Tabla 3. Eficiencia de uso de agua (EUA) promedio para los cinco tratamientos establecidos en los sitios experimentales (cinco en M-T/S) y seis M-S-T/S). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2010/11. **Letras distintas junto a las medias indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para un mismo cultivo ($p < 0.05$).*

| Tratamiento | M-T/S | | | M-S-T/S | | | |
|-------------|---------|---------|----------|---------|----------|-------|----------|
| | Maíz | Trigo | Soja 2da | Maíz | Soja 1ra | Trigo | Soja 2da |
| Testigo | 10,3 b* | 7,6 d | 6,8 b | 11,4 b | 7,5 a | 6,3 a | 4,6 a |
| PS | 12,1 ab | 11,5 bc | 8,4 ab | 14,2 ab | 8,6 a | 8,8 a | 5,4 a |
| NS | 14,2 ab | 10,8 cd | 7,5 ab | 16,0 a | 8,1 a | 7,7 a | 5,3 a |
| NP | 15,1 ab | 14,4 ab | 8,0 ab | 17,0 a | 8,3 a | 9,0 a | 5,1 a |
| NPS | 16,7 a | 15,4 a | 9,3 a | 17,3 a | 9,3 a | 9,2 a | 5,6 a |

Relaciones oferta de agua-rendimiento

Para el caso de soja de primera, los rendimientos alcanzados variaron entre 2289 y 5841 kg ha⁻¹. Solo se encontró correlación entre el rendimiento y el AT al momento de la siembra, observando un óptimo de disponibilidad de agua entre 200 a 250 mm (Figura 1a). En el caso de soja de segunda, los rendimientos se situaron entre 1316 y 6354, y 1357 y 4350 kg ha⁻¹, para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Contrariamente al cultivo de primera, los rendimientos de la leguminosa no se relacionaron con la disponibilidad de agua a la siembra. Sin embargo, se relacionaron con las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo (Figura 1b). Los rangos de disponibilidad de agua a la siembra eran estrechos por la fuerte demanda hídrica del cultivo de trigo anterior, por lo cual, el crecimiento y desarrollo de la soja de segunda dependen fuertemente de las lluvias durante el ciclo del cultivo. Los dos puntos circulados en la Figura 1b, corresponden a casos donde la disponibilidad de agua inicial fue superior a 200 mm.

Los rendimientos de trigo variaron entre 460 y 6354, y 1180 y 4458 kg ha⁻¹, para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Los rendimientos solo se correlacionaron con la variable AT en floración (Figura 1c). El período crítico de trigo comprende -15 a +20 días alrededor de floración (Abbate *et al.*, 1995). En el cultivo de maíz se lograron rendimientos promedios de 9589 y 9920 kg ha⁻¹, variando entre 2434 y 14737, y 4625 y 16092 kg ha⁻¹ para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Los rendimientos de maíz solo se relacionaron de forma significativa con la disponibilidad de agua en la etapa de floración (Figura 1d). Al igual que en el caso de trigo, la oferta hídrica alrededor de floración resulta crítica en la definición del rendimiento del cultivo (Andrade *et al.*, 1999).

Relaciones oferta de agua-respuesta a la fertilización

Las respuestas de los cultivos a los distintos nutrientes y, especialmente, a las interacciones, se han ido ampliando a través de los años debido a la acumulación de fertilidad en los tratamientos fertilizados y la pérdida de la misma en los tratamientos Testigo absoluto o en aquellos sin aplicación de algún nutriente en particular (García *et al.*, 2010). La magnitud de las respuestas como las relaciones con variables de oferta hídrica, mostraron estar influenciadas en algunos casos por la secuencia de cultivos, evidenciando la importancia de las rotaciones en el sistema productivo.

Soja de primera

En general, las mayores respuestas a P y S, se lograron mediante la aplicación conjunta de estos nutrientes. Sin embargo, en forma separada o combinada, mostraron similar patrón de asociación con el nivel de precipitaciones durante el ciclo de cultivo, incrementándose a medida que disminuye el nivel de precipitación (Figura 2). La respuesta a P varió entre -123 a 1118 kg ha⁻¹, y a S entre -126 a 1104 kg ha⁻¹. Este comportamiento en función de la oferta hídrica durante el ciclo, indicaría que el efecto de la práctica de fertilización PS sería más notorio en situaciones hídricas menos favorables, marcando principalmente el efecto positivo del P sobre el desarrollo del sistema radical (Stauffer y

Sulewski, 2003). Por otra parte, se compararon las respuestas a PS, entre los tratamientos sin fertilización nitrogenada en trigo y maíz (PS) vs. aquellos con N en las gramíneas (NPS). Las respuestas variaron entre -29 a 2303 kg ha⁻¹. Si bien mostraron el mismo patrón de asociación con las precipitaciones y las diferencias no fueron significativas entre tratamientos, se observó que en general existe una tendencia favorable al tratamiento NPS, atribuible a la construcción de un ambiente edáfico de mejor calidad (Conforto *et al.*, 2010; Grümberg *et al.*, 2010).

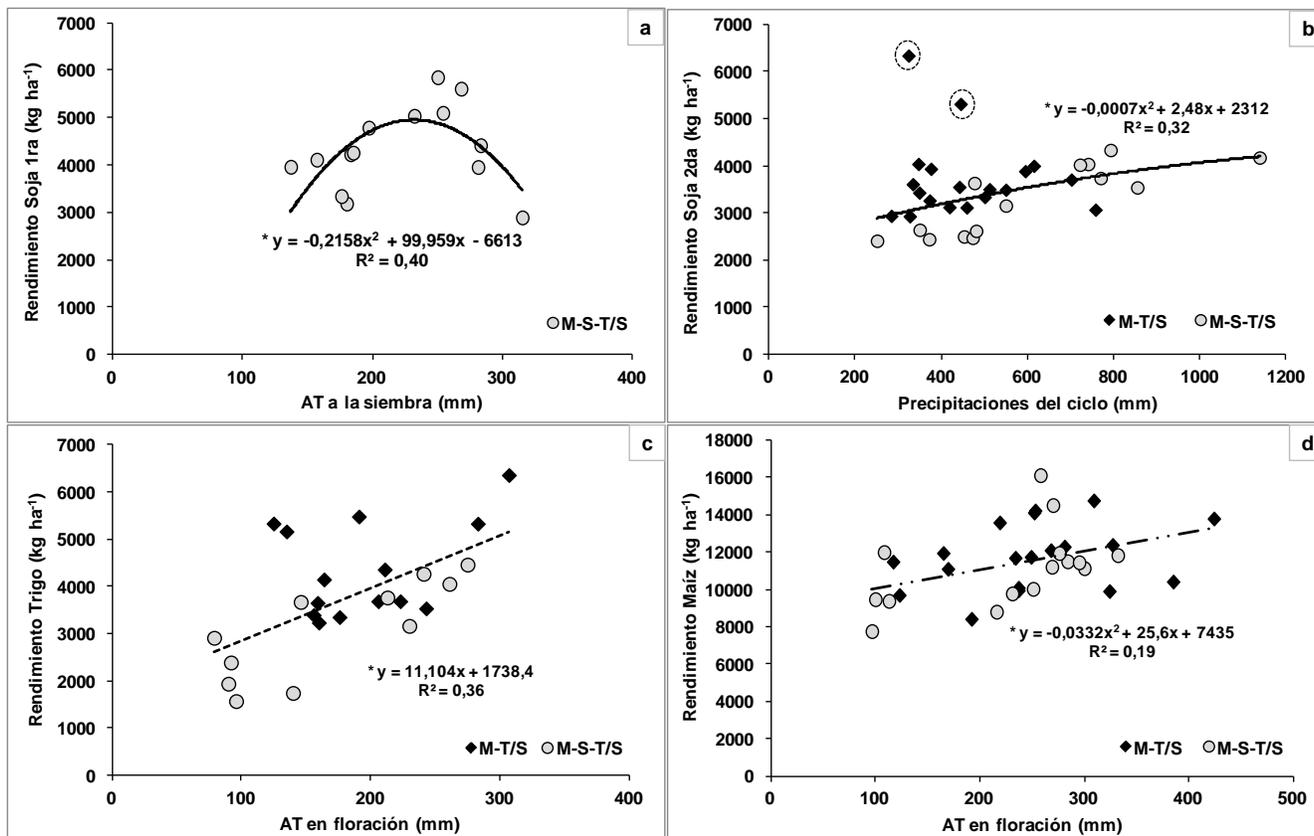


Figura 1: Rendimiento de los cuatro cultivos y su relación con variables de oferta hídrica: (a) Soja de primera y agua total (AT) a la siembra en 0-60 cm; (b) Soja de segunda y precipitaciones registradas durante el ciclo de cultivo; (c) Trigo y nivel de AT en antesis para 0-60 cm; y (d) Maíz y AT en floración en 0-100 cm. Campañas 2001/02 a 2010/11. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. *Regresiones significativas $p < 0,01$. En la figura 1b, los puntos rodeados con un círculo, no fueron incluidos en el análisis de regresión.

Soja de segunda

Las respuestas a PS variaron entre 30 a 2292 kg ha⁻¹. No se encontraron asociaciones entre la respuesta a P y/o S, con las precipitaciones durante el ciclo, o los meses de mayor probabilidad de déficit hídrico (Enero-Febrero), ni con la AT a la siembra o a floración.

Trigo

Las respuestas a N variaron entre 132 a 2598, y -359 a 384 kg ha⁻¹ en rotación M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Esta variación de respuestas a la fertilización nitrogenada, puede atribuirse a una mayor liberación del nutriente desde los residuos del antecesor soja, comparado con residuos de maíz cuya mayor relación C:N promovería los procesos de inmovilización microbiana del N del suelo. Asimismo, debe recordarse que los sitios de cada rotación son independientes.

Las respuestas a N se asociaron con las precipitaciones del mes de Octubre y la disponibilidad de AT a la siembra en la rotación M-T/S (Figura 3). En el primer caso, se observa un umbral de lluvias en Octubre (alrededor de 150 mm) por sobre el cual las respuestas a N tienden a ser nulas o negativas, destacando que la mayoría de estos casos fueron afectados por una alta incidencia de enfermedades. En cuanto a la variable AT a la siembra, es posible que represente un estímulo para la

mineralización de la materia orgánica (MO), y que la liberación de N desde los residuos del antecesor sea mayor en el caso de rastrojo soja, reduciendo la respuesta a la fertilización nitrogenada.

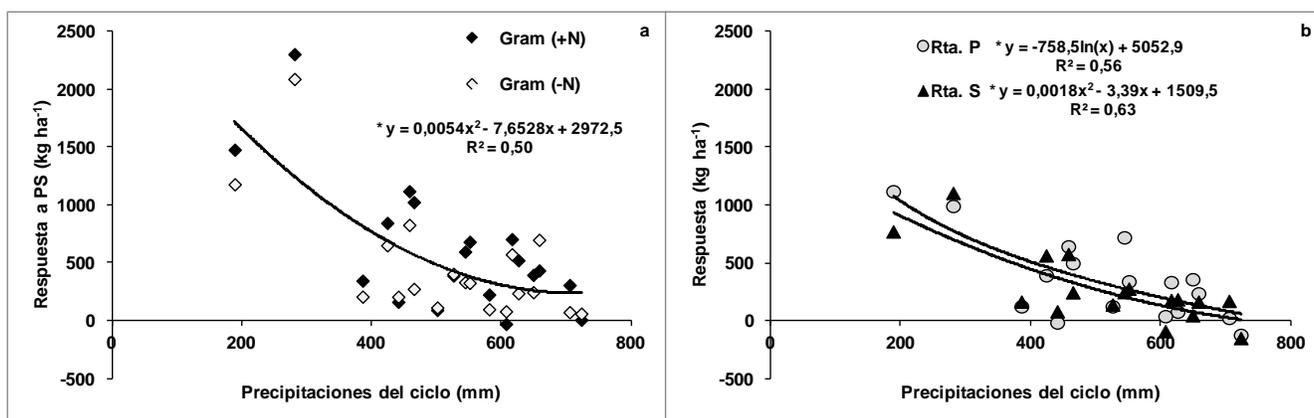


Figura 2: Respuesta en rendimiento de soja de primera a fósforo y azufre (PS) combinados (a), o por separado (b) en función de las precipitaciones registradas durante los ciclos de cultivo. Nota: en la figura (a) los puntos llenos representan tratamientos con (+N) y sin nitrógeno (-N) en las gramíneas de la rotación (maíz y trigo). Campañas 2001/02 a 2010/11. Regresiones significativas $p < 0.01$.

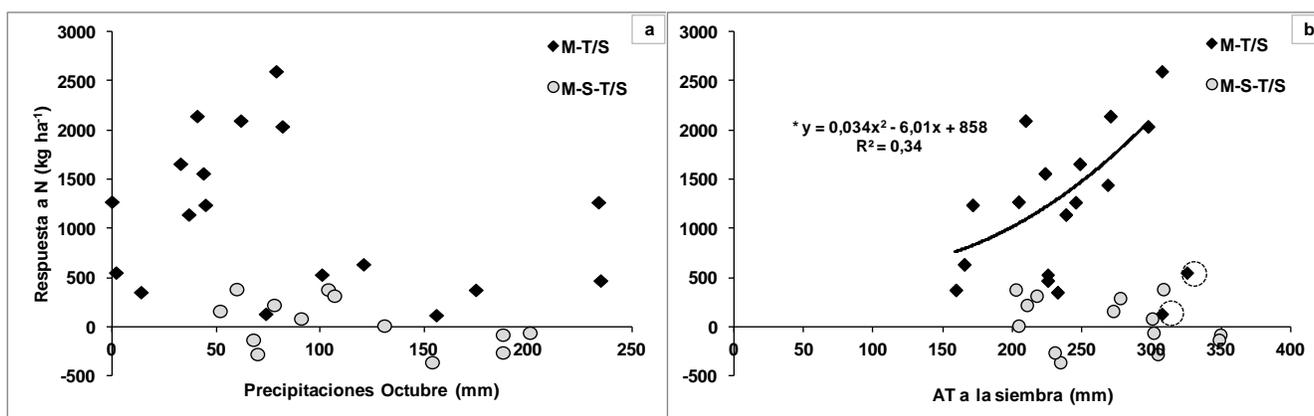


Figura 3: Respuesta en rendimiento de trigo a nitrógeno (N) en función de las precipitaciones registradas durante el mes de Octubre (a) y el nivel de agua total (AT) a la siembra a 0-60 cm (b). Campañas 2001/02 a 2010/11. *Regresión significativa $p < 0.01$. Los sitios rodeados por círculos no se incluyeron en el análisis de regresión.

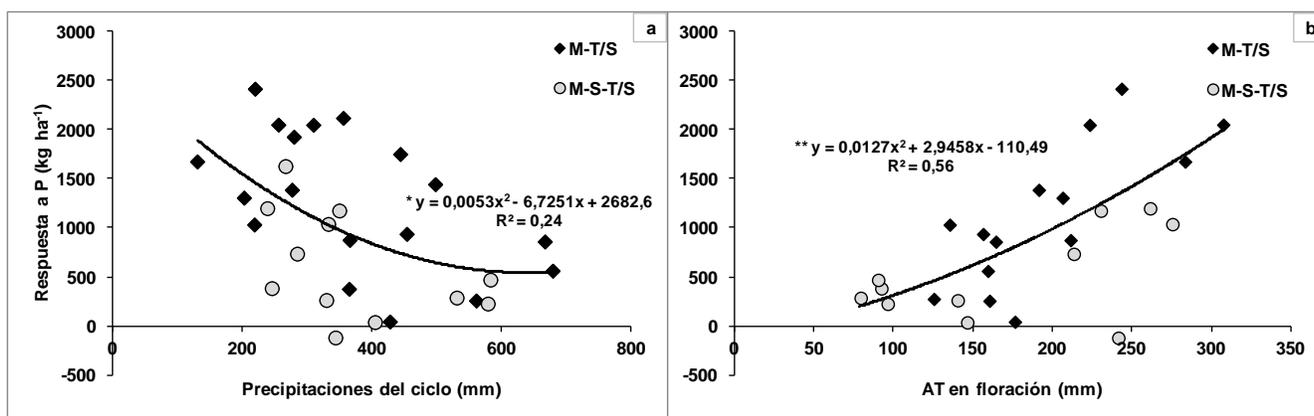


Figura 4: Respuesta en rendimiento de trigo a fósforo (P) en función de las precipitaciones registradas durante los ciclos de cultivo (a) y el nivel de agua total (AT) en floración (b). Campañas 2001/02 a 2010/11. Regresión significativa $*p < 0.05$ - $**0.01$.

En el caso de P, las respuestas logradas variaron entre 41 a 2415, y -559 a 1626 kg ha^{-1} en rotación M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. La respuesta a este nutriente en trigo asoció de manera

significativa a las lluvias registradas durante el ciclo del cultivo, siendo mayor cuando el nivel de precipitaciones fue menor (Figura 4a). Gutiérrez-Boem y Thomas (1998) reportaron que la nutrición fosforada mejoró notablemente la capacidad de las plantas de trigo para soportar situaciones de estrés hídrico. La respuesta a P se asoció en forma positiva con el nivel de AT en floración, con mayores respuestas al incrementarse la disponibilidad de agua en antesis (Figura 4b), de la mano del incremento en los potenciales de rendimiento y, por ende, de los requerimientos del nutriente.

Maíz

Las respuestas a la fertilización nitrogenada en maíz variaron entre 1182 a 5943, y -227 a 5925 kg ha⁻¹, para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Las respuestas a P variaron entre 226 y 6589, y -351 y 4850 kg ha⁻¹, para M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Dichas respuestas a N y a P, no se relacionaron con el AT a la siembra o a floración, ni con las precipitaciones durante todo el ciclo o el período crítico (Diciembre-Enero).

CONCLUSIONES

- En todos los cultivos, las máximas EUA se lograron mediante la fertilización balanceada NPS. Las tendencias por cultivo indican que N impactó en mayor medida la EUA en maíz, P en trigo y PS en soja de primera y de segunda.
- En trigo, las respuestas a la fertilización nitrogenada se incrementaron con el AT a la siembra cuando el antecesor fue maíz, y disminuyeron drásticamente cuando las precipitaciones del mes de Octubre fueron mayores a 100 mm. Las respuestas a P se redujeron con las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y se asociaron en forma positiva con el AT en antesis.
- En soja de primera, las respuestas a P y S, combinados o por separado, fueron mayores en situaciones de menor oferta hídrica durante el ciclo de cultivo.
- En maíz y soja de segunda no se encontraron asociaciones entre la respuesta a nutrientes y las variables de oferta de agua consideradas en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a todos los productores, asesores técnicos y personal de la región CREA Sur de Santa Fe, y a Agroservicios Pampeanos (ASP) por su apoyo continuo a la Red de Nutrición.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate PE; FH Andrade y JP Culot. 1995. The effect of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci.* 124:351-360.
- Alvarez C; M Barraco; C Scianca; M Zaniboni y C Spagnuolo. 2008. Fertilización nitrogenada y eficiencia de uso de agua en trigo en la región subhúmeda y semiárida pampeana. VII Congreso Nacional de Trigo. Santa Rosa, La Pampa.
- Andrade FH; C Vega; S Uhart; A Cirilo; M Cantarero y O Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- Dardanelli J; D Collino; ME Otegui y VO Sadras. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre EH; y col. (Eds.). *Producción de Granos*. EFA. Buenos Aires. Pp. 375-440.
- Conforto; G Figoni; A Rovea; M Boxler; C Oddino; J García; G March; J Meriles y S Vargas Gil. 2010. Evaluación del efecto de la fertilización sobre las comunidades microbianas edáficas. XXII CACS. Rosario, Santa Fe, AACCS.
- García, FO; 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*. 2a Ed. Buenos Aires, AACREA. 2010. 64 pp.
- Grümbert B.; C. Conforto; A Rovea; M Boxler; G March; C Luna; J Meriles y S Vargas Gil. 2010. La glomalina, una glicoproteína producida por hongos micorrízicos, y su relación con la productividad del cultivo de maíz. XXII CACS. Rosario, Santa Fe, AACCS.
- Gutiérrez-Boem F y G Thomas. 1998. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. *Agron J.* 90:166-171.
- Infostat. 2009. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. 336pp.
- Otegui ME. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. En: Primer Simposio Nacional de Agricultura de Secano. E. Hoffman y col. Paysandú, R.O.U., FA (UDELAR) - IPNI: 7-16.
- Quiroga. 2011. El manejo del agua y la fertilidad en la región semiárida pampeana. *Revista Fertilizar* No. 20. Buenos Aires. Argentina: 22-29.
- Stewart WM. 2001. Balanced fertilization increases water use efficiency. *News & Views*. Potash & Phosphate Institute. Norcross. GA. USA. Disponible on-line en www.ipni.net
- Stauffer MD y G. Sulewski. 2003. Fosforo: Un nutriente esencial para la vida. *Actas Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina"*. INPOFOS. Pp.4-7. Rosario, Santa Fe.