

ADITIVIDAD EN LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS EXTENSIVOS A LA FERTILIZACIÓN CON DISTINTOS NUTRIENTES EN LA REGIÓN PAMPEANA

Roberto Álvarez

Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires –
CONICET. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina.
ralvarez@agro.uba.ar

Introducción

En el manejo de la fertilización de los cultivos extensivos, un aspecto que genera dudas al momento de realizar la interpretación y aplicación de los resultados de las redes experimentales es la posible interacción de la respuesta a un nutriente en función de la dosis aplicada de otro nutriente. Esta interacción hace que, por ejemplo, la respuesta al nutriente A dependa de la dosis aplicada de otro nutriente B (Black, 1993; Colwell, 1994). Si bien la interacción puede ser positiva o negativa, generalmente se espera que sea positiva. Cuando no existe interacción, las respuestas son aditivas. Esto implica que se suma la respuesta al nutriente A con la respuesta al nutriente B para determinar la respuesta total a la fertilización de la aplicación combinada de los dos nutrientes.

Teniendo en cuenta la existencia de interacción, para evitar tener limitaciones de otros nutrientes cuando se desarrollan modelos de recomendación de fertilización, comunmente esos otros nutrientes son aplicados al cultivo y se asume que no son limitantes. Así por ejemplo, en el caso de los cultivos de trigo y maíz en la Región Pampeana, para el desarrollo de modelos de recomendación de nitrógeno, comúnmente se ha realizado fertilización de base con fósforo a todos los tratamientos de los experimentos y viceversa, se han fertilizado todos los tratamientos de todos los experimentos con nitrógeno al generar curvas de respuesta a fósforo (Álvarez, 2007). Esto ha llevado a pensar que el otro nutriente habitualmente deficitario no era limitante, con lo cual la interacción entre nutrientes, de existir, era eliminada, obteniéndose modelos de respuesta a un nutriente sin efectos de interacción. Consecuentemente, los modelos de recomendación generados solo serían aplicables a situaciones donde el otro nutriente no sea limitante y, por consiguiente, no podrían hacerse cálculos económicos de respuesta a nitrógeno y fósforo a la vez, pues para que el modelo de nitrógeno sea aplicable, el fósforo no debe limitar y, de la misma manera, para que el modelo de fósforo pueda usarse, el nitrógeno debe haber sido aplicado en altas dosis. En la práctica, para resolver este dilema se apela muchas veces a fertilizar con fósforo usando otras metodologías que no evalúan respuesta ni retorno económico en el corto plazo, como reposición y enriquecimiento, haciéndose uso de modelos de respuesta y evaluaciones económicas sólo para el cultivo fertilizado con nitrógeno (Dobermann y Cassman, 2002).

Muy poco se ha estudiado si el efecto de interacción entre nutrientes en la respuesta a la fertilización es estadística y agrónomicamente significativo en la Región Pampeana. Por ello se han recopilado resultados de varias redes experimentales, donde se han testeado estadísticamente los efectos individuales de diferentes nutrientes sobre el rendimiento de varios cultivos y, también, la significan-

cia de la interacción entre ellos (Tabla 1). Para realizar esta recopilación se consideraron solo casos donde las respuestas individuales a todos los nutrientes aplicados fueran significativas, para evitar incluir estudios donde alguno de los nutrientes testeados no fuera limitante y, por lo tanto, el test de interacción careciera de interés. En la Tabla 1 puede observarse que en general no existen interacciones significativas, desde el punto de vista estadístico, entre nutrientes. Solo en un caso se detectó una interacción significativa entre la dosis de nitrógeno y la de fósforo aplicadas a trigo. Sin embargo, la magnitud del efecto interacción variaba, según las condiciones de sitio y manejo, entre 24 y 58 kg grano ha⁻¹, careciendo de significancia agronómica. Por consiguiente, este efecto no tendría un impacto importante al momento de decidir las dosis a aplicar y podría ignorarse en la práctica.

Un problema de algunas de las metodologías usadas hasta el momento para detectar y cuantificar interacciones entre nutrientes es que el ruido ambiental, y la falta de balance entre tratamientos y condiciones experimentales, pueden hacer que las mismas no sean observadas. Así por ejemplo, técnicas de regresión polinómicas no han detectado como significativa la interacción entre las dosis de nitrógeno aplicadas a trigo y maíz y el nivel de nitrógeno mineral del suelo en la Pampa Ondulada (Álvarez y Grigera, 2005). Esta interacción es muy conocida y se ha probado su existencia muchas veces (Álvarez, 2007). Por ello mi objetivo ha sido, al preparar este trabajo, analizar si existe interacción entre nutrientes que afecten las respuestas de los principales cultivos pampeanos a la fertilización. Empleé para ello resultados de redes experimentales relativamente balanceadas, útiles para estudiar interacciones (Colwell, 1994). En estas redes, los tratamientos de fertilización son más o menos similares y aplicados en la mayoría de los experimentos de igual manera, estando sometidos por consiguiente a las mismas condiciones ambientales dentro de cada experimento. Esto disminuye enormemente el ruido ambiental permitiendo comparaciones más seguras entre tratamientos.

Materiales y métodos

Se analizaron resultados de varias redes experimentales de fertilización de cultivos extensivos realizadas en la Región Pampeana, seleccionándose cinco para su uso en este trabajo (Tabla 2). La selección de las redes fue realizada sobre la base de los siguientes criterios: 1) adecuada descripción de los experimentos, 2) aplicación en cada experimento de combinaciones de dosis de nutrientes y las mismas dosis aplicadas en forma individual o en combinaciones más sencillas, 3) todos los tratamientos de fertilización dentro de cada experimento compartían las condiciones de sitio,

clima y manejo, solo difiriendo en la dosis de nutrientes aplicadas, 4) todos los promedios de los rendimientos de los tratamientos estaban disponibles y 5) las respuestas eran significativas a nivel de la red experimental a la aplicación de los nutrientes individuales.

Para la Región Semiárida Pampeana se seleccionaron una red de fertilización de trigo y otra de girasol (Bono et al., 1997, 1999, 2000). En ambas el diseño de los experimentos involucró un tratamiento testigo sin fertilización y tratamientos con aplicación de nitrógeno, fósforo y combinaciones de nitrógeno y fósforo en cada experimento. Las combinaciones de nutrientes se realizaron con dosis equivalentes a las aplicadas en los tratamientos no combinados. Cada experimento se realizó en un sitio diferente. Las respuestas a los nutrientes se calcularon como la diferencia entre cada tratamiento fertilizado y el testigo correspondiente al experimento. Se obtuvo así, para cada dosis, una respuesta individual a nitrógeno, una respuesta individual a fósforo y otra a la aplicación conjunta de nitrógeno y fósforo. El diseño de estas dos redes experimentales era ideal para estudiar el efecto interacción.

Para la Pampa Ondulada se usaron resultados de la Red CREA Sur de Santa Fe que involucró 13 experimentos de larga duración donde se aplicaron rotaciones que incluían trigo, maíz y soja (García et al., 2006). Los cultivos se repitieron al menos dos veces en cada sitio experimental. Se consideró cada combinación de sitio x año x cultivo como un experimento individual en este análisis. Los nutrientes aplicados fueron nitrógeno, fósforo y azufre. Los cultivos de trigo y maíz fueron fertilizados con nitrógeno, la soja no. El fósforo y azufre se aplicaron a trigo, maíz y soja de primera.

La soja de segunda recibió estos nutrientes pero aplicado en el trigo antecesor. Los tratamientos en cada experimento fueron testigo no fertilizado, fósforo + azufre, nitrógeno + azufre, nitrógeno + fósforo y nitrógeno + fósforo + azufre. Se calculó la respuesta a nitrógeno + fósforo + azufre combinados como la diferencia entre el rendimiento de este tratamiento y el testigo. Las diferencias entre los rendimientos del tratamiento con aplicación de los tres nutrientes y los tratamientos con aplicación de dos nutrientes representaron los efectos individuales de la fertilización con el nutriente faltante en la combinación de a dos nutrientes. El tratamiento fósforo + azufre recibió en algunos casos pequeñas dosis de nitrógeno que formaban parte de la fuente fosforada, las que no se tuvieron en cuenta para el análisis. El diseño de esta red no estaba pensado para el estudio de interacciones entre nutrientes y los resultados del análisis realizado aquí deben tomarse con precaución pues no existían tratamientos con aplicación de nutrientes individuales. Por la forma de calcular los efectos individuales de los nutrientes existe un parcial solapamiento de las interacciones. Sin embargo, en el caso que la respuesta a la aplicación combinada de nutrientes no difiera de la suma de los efectos individuales de los mismos, puede considerarse que no existieron interacciones. Cuando existen interacciones no puede cuantificarse adecuadamente su magnitud con este diseño, solo detectarlas.

La determinación de la significancia de la respuesta a la aplicación individual de cada nutriente y de las combinaciones, a nivel de red experimental, se realizó testeando si las respuestas promedio eran diferentes de 0 usando un test de t ($P = 0.05$). Una vez que se determinó que todas las respuestas individuales

Tabla 1. Fuentes bibliográficas y principales características de redes experimentales donde se ha analizado en el pasado la interacción en la respuesta de los cultivos extensivos a la fertilización con varios nutrientes en la Región Pampeana.

Referencia	Región	Cultivo	Ensayos	Método de análisis	Campañas	Observaciones	Respuesta a N	Respuesta a P	Respuesta a S	Interacción
"Alvarez, Grigera 2005"	Pampa Ondulada	Trigo	10 + datos de lotes	Modelo de rendimiento	6	347	Significativa	Significativa		No significativa
"Alvarez, Grigera 2005"	Pampa Ondulada	Maíz	42 + datos de lotes	Modelo de rendimiento	6	323	Significativa	Significativa		No significativa
Barosela et al. 2008	P. Ondulada y Arenosa	Maíz	13	ANVA de la red	2	13	Significativa	Significativa		No significativa
Prystupa et al. 2006	Pampa Ondulada	Maíz	18	ANVA ensayo x ensayo	2	18		Sig. 56 % exp. ¹	Sig. 39 % exp. ¹	Sig. 0 % exp. ¹
"Ron, Loewy 2000"	SO Bonaerense	Trigo	19	Modelo de rendimiento	3	No indicado	Significativa	Significativa		Significativa
"Sain, Jauregui 1993"	Pampa Ondulada	Trigo	38	Modelo de rendimiento	2	No indicado	Significativa	Significativa		No significativa

¹: Porcentaje de experimentos donde fue significativa la respuesta al nutriente o la interacción.

Tabla 2. Fuentes bibliográficas y principales características de las redes experimentales usadas en este trabajo.

Referencia	Cultivo	Región	N° Experimentos	N° Campañas	N° comparaciones ¹
Bono et al. 1997, 2000 ²	Trigo	Semiárida Pampeana	28	4	224
Bono et al. 19992	Girasol	Semiárida Pampeana	56	6	119
García et al. 2006	Trigo	Pampa Ondulada	24	4	24
García et al. 2006	Maíz	Pampa Ondulada	23	4	23
García et al. 2006	Soja	Pampa Ondulada	35	6	35

¹: En algunas redes existían diferentes combinaciones de dosis de nutrientes en un mismo experimento por lo que se generaron más pares de comparaciones que el número de experimentos realizados. ²: Se dispuso de información adicional a la publicada sobre rendimientos y variables ambientales aportada por los autores.

y las combinaciones fueron significativas, se calculó la posible interacción entre nutrientes en las respuestas a la fertilización comparando por un test de t apareado las respuestas a las aplicaciones combinadas de nutrientes contra la suma de las respuestas a las aplicaciones individuales o la suma de los efectos de los nutrientes ($P = 0.05$). Se consideró como par de datos los generados en cada experimento. En caso de no existir interacción significativa a nivel de red, las respuestas a las aplicaciones combinadas y las sumas de las respuestas a las aplicaciones individuales o efectos individuales no deberían diferir estadísticamente, indicando efectos aditivos. También, para los casos de las redes de trigo y girasol de la Región Semiárida Pampeana, se realizó un análisis gráfico de la posible existencia de interacciones entre nutrientes, experimento por experimento, para luego efectuar regresiones de las respuestas a las aplicaciones combinadas contra las sumas de las respuestas a las aplicaciones individuales y analizando la distribución de los datos alrededor de la línea 1:1. El signo y magnitud de las posibles interacciones se calculó como la diferencia entre las respuestas a las aplicaciones combinadas de nutrientes y

las sumas de las respuestas a las aplicaciones individuales. Se realizaron regresiones de las interacciones así estimadas contra variables de sitio, la disponibilidad de agua a la siembra y el rendimiento de los tratamientos testigos.

Resultados y discusión

En ninguna de las redes experimentales analizadas se detectaron interacciones significativas en las respuestas a las combinaciones de nutrientes considerando todos los datos que integraban cada red en conjunto (Figs. 1, 2 y 3). Las respuestas promedio a las aplicaciones combinadas de nutrientes fueron similares a las sumas de las respuestas a las aplicaciones individuales o los efectos individuales. En consecuencia, a nivel de red, los efectos de la fertilización con varios nutrientes fueron aditivos en todos los casos.

El análisis gráfico de los resultados de las redes de trigo y girasol realizadas en la Región Semiárida Pampeana (Figs. 1 y 2) mostró que en muchos experimentos de cada red las

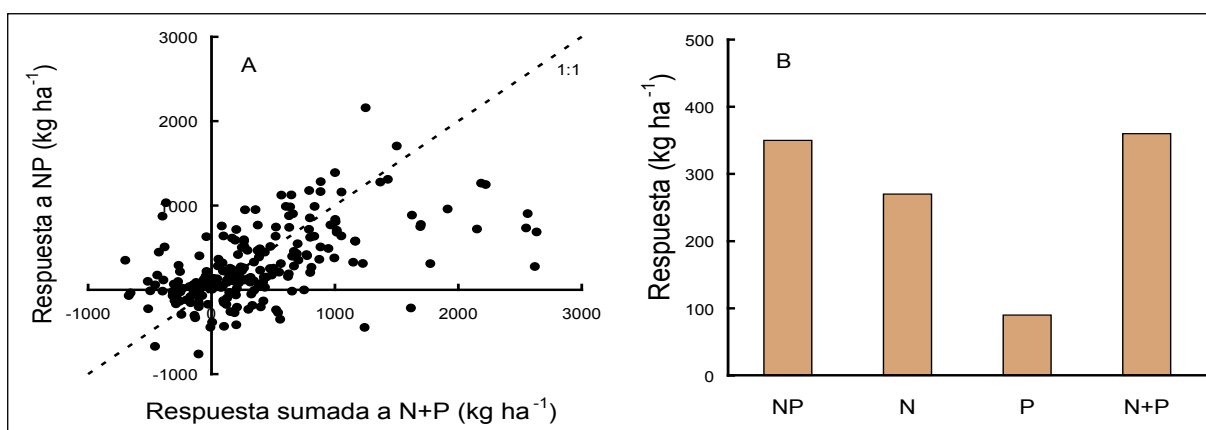


Figura 1. A: Relación entre la respuesta de trigo en la Región Semiárida Pampeana a la fertilización con nitrógeno y fósforo combinados (NP) y la suma de las respuestas a la fertilización individual con nitrógeno y con fósforo (N+P). La línea punteada representa una relación 1:1. B: respuesta promedio de toda la red experimental a la fertilización con nitrógeno y fósforo combinados (NP), solo con nitrógeno (N), solo con fósforo (P) y la suma de las respuestas a la fertilización individual con nitrógeno y con fósforo (N+P). Elaborado con datos de Bono et al. (1997, 2000) y otra información aportada por esos autores.

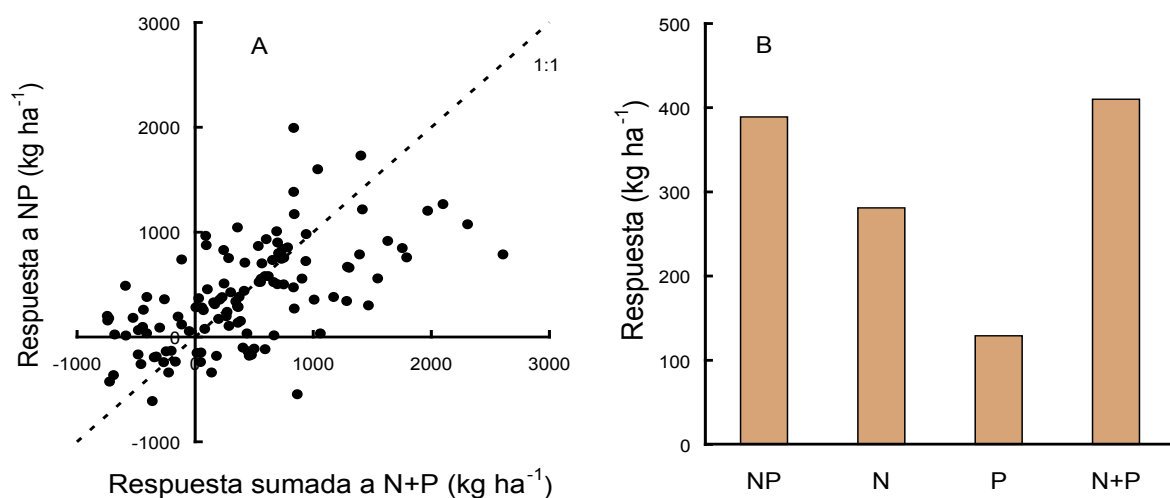


Figura 2. A: Relación entre la respuesta de girasol en la Región Semiárida Pampeana a la fertilización con nitrógeno y fósforo combinados (NP) y la suma de las respuestas a la fertilización individual con nitrógeno y con fósforo (N+P). La línea punteada representa una relación 1:1. B: respuesta promedio de toda la red experimental a la fertilización con nitrógeno y fósforo combinados (NP), solo con nitrógeno (N), solo con fósforo (P) y la suma de las respuestas a la fertilización individual con nitrógeno y con fósforo (N+P). Elaborado con datos de Bono et al. (1999) y otra información aportada por esos autores.

respuestas eran muy similares comparando las aplicaciones combinadas de nutrientes con las sumas de las aplicaciones individuales, estando los puntos sobre o muy cercanos a la línea 1:1. Sin embargo, en muchos otros casos los puntos quedaban muy por arriba o por debajo de dicha línea, indicando posibles interacciones positivas o negativas respectivamente. Las interacciones no correlacionaban con los rendimientos de los testigos, la humedad del suelo a la siembra de los cultivos, las precipitaciones durante el ciclo y los niveles de nitrógeno mineral y fósforo disponible iniciales. Por consiguiente, no fue posible predecir, usando variables de sitio y las precipitaciones, la tendencia de la interacción.

Consideraciones finales

Ninguno de los antecedentes bibliográficos revisados, en los que se analizó la existencia y magnitud de las interacciones entre nutrientes, mostró que las mismas tengan incidencia importante en la respuesta de los cultivos a la fertilización. El análisis de las redes experimentales realizado aquí mostró similares resultados al considerar las respuestas medias de las redes. Algunos experimentos de algunas de las redes mostraron posibles interacciones positivas y otros negativas, no observándose interacciones en muchos otros casos. Estas tendencias no pudieron predecirse usando variables de fertilidad de suelo y de disponibilidad de agua. Por lo tanto, en el manejo de la fertilización en condiciones de producción, queda como única alternativa por el momento usar los escenarios medios. En éstos, las respuestas a la fertilización combinada con distintos nutrientes es de naturaleza aditiva. Pueden sumarse entonces las respuestas que se logran con distintos nutrientes para estimar la respuesta total del cultivo. Actualmente estos resultados adquieren más importancia en trigo que en otros cultivos pues se dispone de numerosas metodologías para cuantificar las respuestas del mismo a nitrógeno y a fósforo en varias subregiones pampeanas (Alvarez, 2007). Las respuestas que predicen esas metodologías pueden sumarse para el cálculo del retorno económico de la fertilización. En el caso que para la fertilización fosforada se aplicara una dosis mayor a la de reposición del cultivo, habría que considerar en la evaluación económica a largo plazo el efecto adicional de la residualidad del fósforo sobre la respuesta de los cultivos siguientes (Alvarez, 2008). A medida que se vayan desarrollando modelos de predicción de respuesta para otros cultivos y nutrientes se podría ir aplicando esta misma concepción para la predicción de la respuesta a varios nutrientes. Incentivar el estudio de las interacciones entre nutrientes parece una línea de investigación relevante para mejorar en el futuro las recomendaciones de fertilización,

con vista a la predicción de la magnitud de la interacción en cada escenario de producción.

Bibliografía

- Alvarez R.** 2007. Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Buenos Aires, Argentina, 223 pág.
- Alvarez R.** 2008. Análisis de la conveniencia económica de utilizar umbrales fijos para recomendar la fertilización nitrogenada y fosforada de trigo. VII Congreso Nacional de Trigo, actas 18 pág.
- Alvarez R. y S. Grigera.** 2005. Analysis of soil fertility and fertilizer effects on wheat and corn yield in the Rolling Pampa of Argentina. *J. Agron. Crop. Sci.*, 191: 321-329
- Barosela H., M. Barraco, J.J. Cavo, E. Cassina, L. Couretot, G. Ferraris, E. Lemos, M. Lopez de Sabando, A. Martín, F. Mousegne, A. Paganini, R. Pontoni, R. Sola, G. Tellería y L. Ventimiglia.** 2008. Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la Provincia de Buenos Aires. *Fertilizar* 10: 16-27
- Black C.A.** 1993: Soil fertility evaluation and control. Lewis Publ., Boca Raton, 729 pág.
- Bono A., J.C. Montoya y F.J. Babinec.** 1999. Fertilización de girasol. Resultados obtenidos en tres años de estudio. Publicación Técnica N° 48 INTA Anguil, 26 pág.
- Bono A., J.C. Montoya y F.J. Babinec.** 2000. Dosis y momentos de fertilización en trigo en la Región Semiárida Pampeana. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas en CD, 4 pág.
- Bono A., J.C. Montoya, P. Lescano y F.J. Babinec.** 1997. Fertilización de trigo con nitrógeno y fósforo en la Región Semiárida Pampeana. Campaña 1996-1997. Publicación Técnica N° 47. EEA INTA Anguil
- Colwell J.D.** 1994: Estimating fertilizer requirements. CAB Int. Inglaterra, 259 pág.
- Dobermann A. y K.G. Cassman.** 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil* 247: 153-175
- García F., M. Boxler, J. Minteguiga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Martín y A. Berardo.** 2006. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Ed. INPOFOS, 32 pág.
- Prystupa P., F. Salvagiotti, G. Ferraris, F. Gutierrez Boem, L. Couretot y D. Dignani.** 2006. Fertilización de maíz en norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. II- Interacción fósforo x azufre. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, actas 5 pág.
- Ron M.M. y T. Loewy.** 2000. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18: 44-49
- Sain G.E. y M.A. Jauregui.** 1993. Deriving fertilizer recommendations with a flexible functional form. *Agron. J.* 85: 934-937. ■

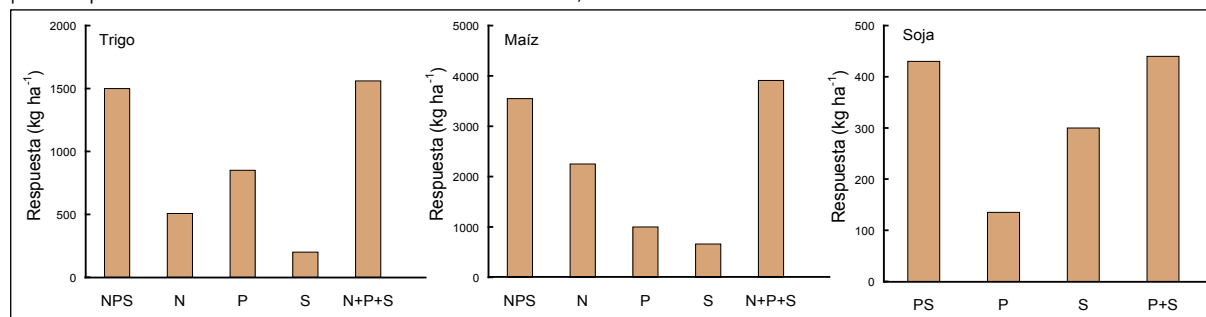


Figura 3. Respuestas promedio de trigo, maíz y soja de la Red CREA Sur de Santa Fe a la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre combinados (NPS), efecto del nitrógeno (N), efecto del fósforo (P), efecto del azufre (S) y suma de los efectos del nitrógeno, fósforo y azufre (N+P+S). Elaborado con datos de García et al. (2006).