

NUTRICIÓN DE MAÍZ: REQUERIMIENTOS Y ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

Ignacio A. Ciampitti¹, Miguel Boxler² y Fernando O. García³

¹ Purdue University, West Lafayette, Indiana, EE.UU. iciampit@purdue.edu; ² Región CREA Sur de Santa Fe, Argentina; mboxler@arnet.com.ar; ³ IPNI Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina, fgarcia@ipni.net

Introducción

Durante las últimas décadas, el cultivo de maíz ha presentado un incremento continuo en productividad, como resultado de un conjunto de prácticas de manejo implementadas, junto con el progreso del mejoramiento genético. Este incremento en productividad trae aparejado un aumento de la materia seca total y, en consecuencia, de la acumulación o absorción de nutrientes (Karlen *et al.*, 1987).

En lo que respecta al diagnóstico de fertilidad, en el caso del N, la dosis a emplear se puede determinar a través de la relación entre el nitrógeno (N) disponible (N-nitratos del suelo a pre-siembra, 0-60 cm, más N fertilizante) y el rendimiento del cultivo. Es bien conocido que pueden obtenerse respuestas variables a la aplicación de N debido a diferencias en las condiciones climáticas (temperatura, precipitación), de suelo (temperatura, materia orgánica, textura), y prácticas de manejo (irrigación, densidad, arreglo espacial, fertilización), como así también por el uso de diferentes genotipos (interacción Genotipo x Ambiente x Manejo). Una parte de esta variabilidad puede ser explicada debido a la diferencias en el potencial del sitio en proveer N (proveniente de la materia orgánica del suelo). Por otro lado, el requerimiento de N de maíz varía con el rendimiento del cultivo y los factores que gobiernan la determinación del mismo (clima, genotipo, prácticas de manejo). Asimismo, como ocurre con el N, para el caso del fósforo (P), la fertilización fosfatada debería relacionarse con la capacidad del suelo para satisfacer la máxima demanda de este nutriente por el cultivo (Ciampitti *et al.*, 2010). Para la situación del azufre (S), la información disponible acerca del manejo de este nutriente y los requerimientos del mismo por el cultivo de maíz es más escasa.

Un programa de fertilización balanceada, que incluya la aplicación de N, P y S, es esencial para optimizar el rendimiento del cultivo, incrementar la rentabilidad y mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes (provenientes del suelo y del fertilizante) por parte del cultivo, minimizando el impacto sobre el ambiente. La adopción de las mejores prácticas de manejo (MPM) para el uso de los fertilizantes es necesaria para incrementar y estabilizar los rendimientos y promover la sustentabilidad de la producción agropecuaria. Teniendo este objetivo como herramienta de trabajo, este escrito discute y re-examina brevemente la acumulación de nutrientes (N, P y S) por el cultivo

de maíz. Los objetivos propuestos son: (i) determinar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización NPS sobre la productividad del cultivo (impacto en el rendimiento por unidad de área), (ii) estudiar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización NPS sobre los patrones de acumulación de nutrientes en maíz, y (iii) conocer más acerca de la dinámica de absorción de los nutrientes y los requerimientos de los mismos por parte del cultivo de maíz.

Materiales y métodos

Las evaluaciones se realizaron en la campaña 2006/07 en cuatro ensayos de la Red de Nutrición CREA del Sur de Santa Fe (García *et al.*, 2006): San Alfredo y La Marta en rotación maíz-trigo/soja (M-T/S) y La Blanca y La Hansa en rotación maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S) (Tabla 1). Se debe considerar que los tratamientos evaluados, presentan una historia continua de manejo de fertilización (mismo tratamiento de fertilización aplicado durante varias campañas agrícolas, desde el comienzo de la red, año 2000). Por lo tanto, las diferencias entre tratamientos responden al efecto directo de la fertilización del cultivo y al efecto residual de fertilizaciones de años anteriores. Los tratamientos evaluados fueron: i) Testigo, ii) NP, iii) NS, iv) PS, y v) NPS. En todos los sitios, el arreglo experimental fue el de diseño bloques completamente aleatorizados (DBCA) con tres repeticiones. El tamaño de las parcelas fue de 25-30 m de ancho y de 65-70 m de largo. En todos los sitios experimentales evaluados, el híbrido de maíz utilizado en la campaña agrícola 2006/07 fue el Dekalb AW 190 MG. Las prácticas de manejo del cultivo, fecha de siembra, e intervalo siembra-cosecha se indican en la Tabla 1. En todos los sitios, el cultivo antecesor fue trigo/soja de segunda.

Los fertilizantes fueron aplicados a la siembra del cultivo. Las dosis de N se decidieron a través de la relación entre el N disponible ($N-NO_3^-$; 0-60 cm, pre-siembra + N fertilizante) y en base al rendimiento esperado dentro de cada rotación evaluada. Las dosis de P y S fueron obtenidas estimando la extracción del cultivo más un 10%, para construir nivel del nutriente en el suelo (filosofía de reposición y construcción). Para la campaña evaluada, la dosis de N utilizada fue de 175 kg N ha^{-1} , aplicados como urea. En los tratamientos que recibieron P (PS, NP y NPS), la dosis

utilizada fue de 40 kg P ha⁻¹ y la fuente fue el fosfato monoamónico (12% N, 22.5% P). En el caso del S, tratamientos PS, NS y NPS, la fertilización azufrada fue de 24 kg S ha⁻¹ y la fuente utilizada fue el sulfato de amonio peleteado (19% S). En todas las situaciones, los fertilizantes fueron aplicados mediante mezclas físicas antes o al momento de siembra, incorporándolos a una distancia de por lo menos 5 cm de la semilla para evitar posibles efectos fitotóxicos (Ciampitti *et al.*, 2006).

Biomasa y Absorción de Nutrientes

Para el cálculo de la acumulación de biomasa y extracción de nutrientes del cultivo de maíz, fue necesaria la cosecha de 15 plantas en 5 diferentes estados fenológicos (Ritchie & Hanway, 1984): V3 (tres hojas), V10 (diez hojas), R1 (floración), madurez fisiológica y comercial (MF y MC, respectivamente). Las plantas cosechadas fueron secadas a 70°C hasta peso constante para la determinación de materia seca. Posteriormente, las muestras fueron molidas y pasadas por un tamiz de 0.1 mm. La determinación de N total fue realizada mediante el método de Kjeldahl (Bremner, 1965). Las concentraciones de P y S fueron determinadas mediante digestión ácida con ácido nítrico y perclórico (Johnson & Ulrich, 1959). Las concentraciones de nutrientes en todas las fracciones se encuentran expresadas en base seca (0% humedad). A modo práctico, para observar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre la acumulación de nutrientes, se realizó un promedio entre los sitios evaluados y, en forma general, se presenta la acumulación de N, P y S para los diferentes ambientes y estaciones de crecimiento del cultivo analizadas. A madurez comercial, el índice de cosecha de nutrientes para N, P y S (ICN, ICP, ICS) fue calculado de la siguiente forma:

$$\text{Índice de Cosecha de Nutriente (\%)} = \left(\frac{\text{Contenido de Nutriente en Semilla}}{\text{Contenido de Nutriente en el Residuo} + \text{Semilla}} \right) * 100$$

Rendimiento del cultivo de maíz

Los rendimientos de maíz de la campaña 2006/07 fueron muy buenos, debido a un régimen climático propicio para el desarrollo y crecimiento del cultivo. Los rendimientos máximos se registraron en el tratamiento NPS variando entre 11425 kg.ha⁻¹ en La Hansa a 16090 kg.ha⁻¹ en La Blanca (Tabla 2). Los rendimientos del tratamiento Testigo variaron entre 5731 kg.ha⁻¹ en La Hansa a 9720 kg.ha⁻¹ en San Alfredo.

Se observaron respuestas significativas a los tratamientos de fertilización en los cuatro sitios. Las respuestas promedio a N, P, S y a NPS fueron de 3248, 1369, 698 y 5359 kg.ha⁻¹, respectivamente. Evaluando el efecto de cada nutriente en forma individual, la aplicación de N y de P incrementó los rendimientos

del cultivo en todos los sitios ($P < 0.05$). La respuesta a S fue significativa en solo un sitio (San Alfredo).

Absorción, extracción y requerimiento de N, P y S por el cultivo de maíz

La aplicación balanceada de N, P y S produjo un incremento en los rendimientos reflejado directamente en un aumento de la absorción de nutrientes (N, P y S) respecto a los tratamientos con aplicaciones desbalanceadas o sin aplicación de nutrientes (Fig. 1). Sin embargo, el patrón de absorción de nutrientes por el cultivo de maíz no fue afectado por los diferentes tratamientos de fertilización (Fig. 1). Las primeras diferencias en absorción entre tratamientos

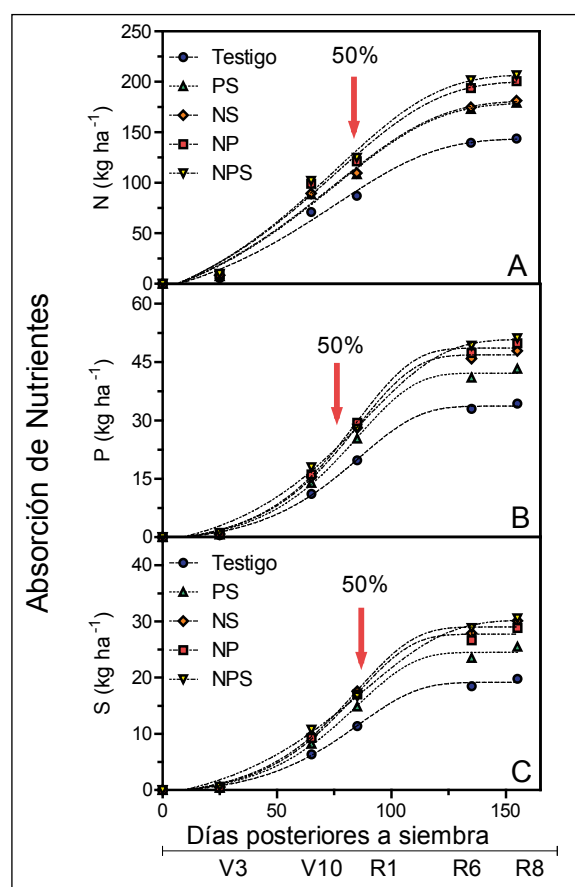


Figura 2. Rendimiento en grano (A), expresado en ton ha⁻¹, y absorción total de N a madurez comercial (B), en kg N ha⁻¹, en función de la absorción de S y P, ambos expresados en kg de nutriente ha⁻¹, total acumulada a madurez comercial (R8). En la parte inferior izquierda, se señala en una caja el tratamiento Testigo (sin aplicación de nutrientes), presentando bajos rendimientos (A) y absorción de N (B); mientras que en la parte superior derecha de las figuras se encuentra el otro extremo, aplicación balanceada de nutrientes, el tratamiento NPS, resultando en una absorción balanceada de P y S, lo que genera mayores rendimientos (A) y por consiguiente, una mayor absorción de N (B).

de fertilización se puede detectar a los 25 días posteriores a la siembra del cultivo (estadio tres hojas; V3). Estas diferencias tienden a ser mayores a favor del tratamiento con aplicación balanceada de N, P y S (NPS) respecto al Testigo absoluto (Fig. 1).

En todos los sitios, la máxima absorción de nutrientes se encuentra directamente relacionada con un mayor rendimiento logrado. A floración, la absorción de N presentó un rango entre 50 y 126 kg N ha⁻¹ (según tratamiento de fertilización), resultando en promedio, un 50% del total de N acumulado a madurez fisiológica (Fig. 1A). En general, la cantidad de N absorbida post-floración se encuentra directamente determinada por la demanda de N del grano. En maíz, las diferencias en el nivel de removilización pre-floración y la tasa de absorción de N, contribuyen a diferentes contenidos de N en grano y rendimientos del cultivo (Muchow, 1988). En el caso del P, al momento de floración, la absorción total del nutriente representó un 57% del total acumulado por el cultivo a madurez (Fig. 1B). Siguiendo un patrón de absorción similar a N, la absorción de S al momento de floración fue de un 47% respecto del total acumulado al momento de cosecha del cultivo, presentando un rango de entre 10 a 18 kg S ha⁻¹ (Fig. 1C).

En relación a la evolución en la absorción de nutrientes, en general podemos destacar dos puntos o estados fenológicos: V3 (tres hojas) y R1 (floración). En el primero se comienzan a observar diferencias entre tratamientos de fertilización y en el segundo, los cambios en absorción de nutrientes son notables (Fig. 1). El patrón de acumulación de N fue muy similar al ritmo de acumulación de materia seca, mientras que la acumulación de P fue más rápida durante las etapas vegetativas (Fig. 1A, B). Más aún, la acumulación del S siguió un ritmo similar al N (Fig. 1A, C). Se debe destacar que los patrones de acumulación de nutrientes pueden ser variables con los diferentes ambientes, condiciones y tipo de suelo, variedad de cultivo y otras prácticas de manejo como irrigación, fertilización, etc. (Hanway, 1962).

La remoción de N en grano, o ICN, representó entre el 69% y 74% del total de N acumulado por el cultivo a madurez comercial (Tabla 3). Para el caso de P, la remoción en el grano (ICP) presentó una variación entre el 75% y 82% del total de P acumulado por la planta (Tabla 3). El ICS varió entre el 54% y 63%. Los valores de ICN e ICP son similares a los registrados en experiencias previas (Ciampitti y García, 2007). Sin embargo, el ICS es superior a ICS promedios del 35% recopilados por los mismos autores.

La removilización de nutrientes por parte del cultivo es un parámetro a tener en cuenta en lo que respecta al uso de los mismos. Convencionalmente, la forma de calcular la translocación de nutrientes es mediante un simple cálculo de la cantidad de acumulada en toda la planta a floración menos la acumulación en las estructuras vegetativas a MF. Para el caso del N, la translocación desde las estructuras vegetativas al

grano varió entre 18 a 60 kg N ha⁻¹, conteniendo los granos un 35-48% del N absorbido a floración proveniente de estructuras vegetativas. La magnitud de P translocado hacia el grano, presentó un rango entre 46% a 59% del P absorbido a floración. Para el S, la absorción post-floración osciló entre 8 a 13 kg ha⁻¹ dependiendo del tratamiento de fertilización evaluado (Fig. 1C) y entre el 41% a 53% del S absorbido a floración fue removilizado hacia los granos. A madurez fisiológica, el ICN es un indicador de la magnitud de N removilizado desde las estructuras vegetativas. En nuestro trabajo, un incremento en el ICN fue observado a medida que el N se convertía en limitante para el crecimiento del cultivo; situación que ocurrió en el tratamiento con aplicación conjunta de P y S (PS), lo que sugiere un aumento en la removilización de N. La removilización de N desencadena un proceso de senescencia anticipada del cultivo debido a que reduce el contenido de N de las hojas, y consecuentemente, su actividad fotosintética (reducción en la acumulación de biomasa) (Ciampitti & Vyn, 2010). En el caso de P, el ICP presentó los mayores valores en los tratamientos Testigo y NPS, sugiriendo que con ausencia de aplicación de nutrientes la capacidad del cultivo en absorber P se ve afectada (menor exploración radicular) y, en consecuencia, la removilización hacia el grano es mayor. Por otro lado, en el tratamiento con aplicación conjunta de N, P y S (NPS), podría ocurrir que el ritmo de acumulación de materia seca es superior a la tasa de absorción de P, lo cual genera una mayor translocación desde las estructuras vegetativas hacia el órgano destino (espiga). Para el S, fue reportada una mayor variabilidad en el ICS, sin presentar una clara tendencia o patrón, respecto a los observados para N y P (Tabla 3).

En este trabajo, el requerimiento de N para producir una tonelada de materia seca varió entre 14 a 18 kg N ton⁻¹. Se debe notar, que este requerimiento presentó una menor variabilidad que el rendimiento en sí mismo, el cual presentó un rango entre 5 y 16 toneladas (Tabla 2). Situación similar ocurrió con los nutrientes P y S, en los cuales el requerimiento varió entre 3 a 5 kg P ton⁻¹ y 2 a 3 kg S ton⁻¹. En comparación con estos resultados, la recopilación de bibliografía nacional e internacional presentada por el IPNI reporta valores de 21 kg N ton⁻¹, 4 kg P ton⁻¹ y 3 kg S ton⁻¹ (Ciampitti y García, 2007).

La complejidad de la interacción entre nutrientes, en este caso entre N, P y S, puede ser observada en la Figura 2. Para la elaboración de esta figura se utilizó la absorción de nutrientes al momento de madurez comercial (absorción total) y el rendimiento del cultivo, para todos los tratamientos de fertilización evaluados. Primero, podemos observar en la Figura 2A, como incrementos en la absorción de P y S (en forma balanceada) se correlacionan con aumentos constantes en el rendimiento del cultivo de maíz. Segundo, cuando analizamos la absorción de N como variable respuesta en

función de la absorción de P y S (Fig. 2B), nuevamente se puede observar la correlación entre el equilibrio en la absorción de P + S, y los aumentos en la absorción de N. En lo que respecta a los tratamientos de fertilización, el tratamiento Testigo se ubica en la parte inferior izquierda de la Figura 2 (baja absorción de P y S), y se correlaciona con menores rendimientos y absorción de N. En el otro extremo se encuentra el tratamiento NPS -parte superior derecha- (alta absorción de P y S), relacionado con mayores rendimientos y alta absorción de N. A partir de nuestra información se puede observar que la forma de respuesta del rendimiento y la absorción de N son diferentes (Fig. 2A, B). El rendimiento del cultivo de maíz responde independientemente a la acumulación de P y S y, por el otro lado, la absorción de N responde más robustamente a mayores niveles de absorción de P y S (relacionado con rendimientos

superiores a 12-13 ton ha⁻¹). Por último, realizando una evaluación de ambas figuras en forma conjunta podemos concluir: (i) la importancia del N en la formación de rendimiento para el cultivo de maíz, y (ii) como ese equilibrio entre P y S se correlaciona con incrementos constantes en la absorción de N, y por consecuente, mayores rendimientos logrados del cultivo de maíz.

Conclusión

Desde el punto de vista de una agricultura sustentable, el manejo de nutrientes en un sistema de producción debería mantener una relación balanceada entre ingresos y egresos de nutrientes en el largo plazo. De tal forma, para conservar los niveles de fertilidad de los suelos, los nutrientes removidos por la cosecha de los cultivos deberían ser reemplazados anualmente

Tabla 1. Sitios experimentales, historia de manejo de lote y características del cultivo.

	Rotación M-S-T/S		Rotación M-S-T/S	
	La Marta	San Alfredo	La Blanca	La Hansa
Fecha de siembra	14/09	9/09	18/10	13/10
Intervalo siembra a cosecha (días)	216	194	167	188
Tipo de suelo	Hapludol éntico	Argiudol típico	Hapludol típico	Argiudol ácuico
Historia agrícola (años)	46	14	12	+26

Tabla 2. Rendimiento en grano para los diferentes tratamientos de fertilización en los cuatro sitios evaluados.

Tratamientos	San Alfredo	La Marta	La Hansa	La Blanca	Promedio
	----- kg.ha ⁻¹ -----				
Testigo	9720 d [#]	7499 d	5731 d	10131 d	8270
PS	11494 c	9449 c	8761 c	11818 c	10381
NS	13305 b	10496 b	11161 a	14078 b	12260
NP	13306 b	12232 b	10093 b	16092 a	12931
NPS	14737 a	12264 a	11425 a	16090 a	13629

[#] Rendimientos seguidos con una misma letra, para cada sitio, no difieren significativamente al nivel de $P < 0.05$.

Tabla 3. Índice de cosecha de nutrientes (N, P y S) para los cuatro sitios experimentales y diferentes tratamientos de fertilización evaluados.

Tratamientos	Índice de Cosecha de N				Índice de Cosecha de P				Índice de Cosecha de S			
	San Alfredo	La Marta	La Hansa	La Blanca	San Alfredo	La Marta	La Hansa	La Blanca	San Alfredo	La Marta	La Hansa	La Blanca
Testigo	0.71	0.71	0.72	0.71	0.81	0.77	0.79	0.78	0.63	0.59	0.61	0.60
PS	0.73	0.74	0.73	0.73	0.76	0.76	0.75	0.77	0.63	0.62	0.60	0.63
NS	0.71	0.71	0.70	0.71	0.79	0.77	0.77	0.79	0.58	0.56	0.54	0.58
NP	0.69	0.69	0.69	0.69	0.79	0.79	0.77	0.79	0.60	0.61	0.57	0.60
NPS	0.71	0.71	0.71	0.71	0.82	0.81	0.81	0.82	0.62	0.62	0.61	0.63

o al menos dentro del ciclo de rotación de cultivos. A través de estudios de absorción y extracción de nutrientes se pueden obtener valores más precisos de requerimientos nutricionales por los cultivos, lo que permite una mejora en la planificación y la programación del manejo de nutrientes en la producción de cultivos. Más aun, debemos seguir investigando en este camino debido a que valores establecidos en el pasado podrían no ser correctos para las tecnologías y prácticas de manejo actuales como híbridos, densidades, rendimiento potencial y condiciones de suelo (interacción Genotipo x Ambiente x Manejo).

Referencias

Bremner J.M. 1965. Organic nitrogen in soils. p. 93-132. In W.V. Bartholomew and F.E. Clark (ed.) Soil nitrogen. Agron. Monogr. 10. ASA, Madison, WI.

Ciampitti I.A., Fontanetto H., Micucci F. y F.O. García. 2006. Manejo y ubicación del fertilizante junto a la semilla: Efectos Fitotóxicos. Informaciones Agronómicas N° 31, Archivo Agronómico N° 10. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. Disponible en <http://www.ipni.net/lasc>

Ciampitti I.A. y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. Informaciones Agronómicas N° 33, Archivo Agronómico N° 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Disponible en <http://www.ipni.net/lasc>

Ciampitti I.A., F.O. García, G. Rubio y L.I. Picone. 2010. Phosphorus: balance and soil extractable dynamics in field crops rotations in Pampean soils. Soil Science Society of America Journal. Doi:10.2136/sssaj2009.0345.

Ciampitti I.A. & T.J. Vyn. 2010. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. Field Crops Research (accepted).

García F., M. Boxler, J. Minteguiga, H. Blanco, R. Houssay, G. Deza Marín y A. Berardo. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. 32 pp. ISBN 987-22576-7-1.

Hanway J.J. 1962. Corn growth and composition in relation to soil fertility: 1. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. Agronomy Journal 54: 145-148.

Johnson C.M. & A. Ulrich. 1959. II Analytical Methods. For Use in Plant Analysis. Certified Agriculture Experimental Station Bulletin 766. Pp 26-27.

Karlen D.L., E.J. Sadler & C.R. Camp. 1987. Dry matter, N, P and K accumulation rates by corn on Norfolk loamy sand. Agronomy Journal 79: 649-656.

Muchow R.C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment III. Grain yield and nitrogen accumulation. Field Crops Research 18: 31-43.

Ritchie S.W. & J.J. Hanway. 1984. How a corn plant develops: Special report No. 48, Iowa State University. ■

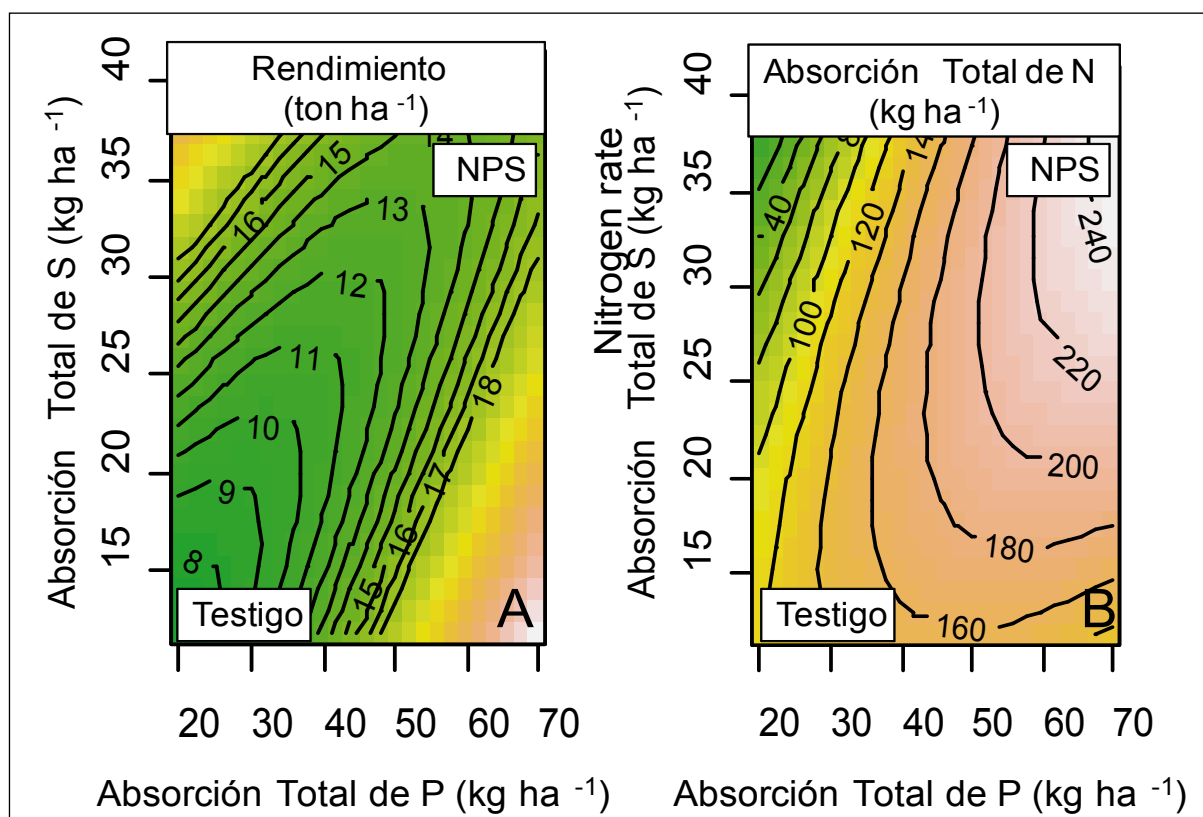


Figura 1. Absorción de nutrientes (N, P y S), expresados en kg nutriente ha⁻¹, durante los estadios vegetativos (V3 y V10) y reproductivos (R1, R6 y R8) del cultivo de maíz para diferentes tratamientos de fertilización, promedio de los cuatro sitios. La flecha de color rojo indica el punto de 50% de acumulación de nutriente respecto del total acumulado a madurez comercial para el cultivo de maíz.