

Del paper al lote:

¿Cuándo, cómo y por qué debería fertilizar mis maíces?

Nahuel Reussi Calvo^{1,2,3}, Natalia Diovisalvi¹, Ángel Berardo¹ y Fernando O. García^{1,2,4}

¹Laboratorio FERTILAB, ²FCA-INTA Balcarce, ³CONICET, ⁴Consultor privado
E-mail: nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar

En un contexto de producción agropecuaria cada vez más demandante, diagnosticar correctamente el estado nutricional de los cultivos, es condición necesaria para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e insumos involucrados en el sistema productivo. El manejo adecuado de la nutrición del cultivo de maíz constituye uno de los principales factores para maximizar la producción actual y reducir la brecha de rendimiento en las diferentes zonas maiceras argentinas.

Dentro de los nutrientes, el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los que con mayor frecuencia limitan el rendimiento, sin embargo, en las últimas décadas, la intensificación de la agricultura ha generado una disminución en la disponibilidad de azufre (S) en los suelos y, por lo tanto, es cada vez más frecuente determinar la respuesta en rendimiento frente al agregado de dicho nutriente. Asimismo, otros nutrientes como el zinc y el boro se han diagnosticado como deficientes en algunos sistemas de producción de la región pampeana. Trabajos realizados en los últimos años en forma conjunta entre CREA Sur de Santa Fe, IPNI y Nutrien Ag Solutions, muestran que la nutrición balanceada con NPS genera respuestas promedio en rendimiento de maíz de 4793 a 5158 kg ha⁻¹, lo cual se traduce en márgenes brutos que varían desde 120 hasta 240 \$/ha según sitio experimental (**Fig. 1**).

M-S-T/S 19 sitios-año			M-T/S 19 sitios-año		
Tratamiento	Respuesta		Tratamiento	Respuesta	
	kg/ha	Relativa		kg/ha	Relativa
PS	1948	26%	PS	1729	26%
NS	3755	51%	NS	3439	52%
NP	3586	49%	NP	3507	53%
NPS	4474	61%	NPS	5122	78%
Completo	4793	65%	Completo	5158	79%

Figura 1. Respuesta en rendimiento absoluta y relativa al Testigo sin fertilizar en los ensayos de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA Sur de Santa Fe-IPNI-Nutrien Ag Solutions). Rotaciones maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S) y maíz-trigo/soja (M-T/S). Dosis de 100-150 kg N/ha; 20-30 kg P/ha; y 12-20 kg S/ha. El tratamiento Completo incluye la aplicación de potasio, magnesio, zinc y boro.

La bala de plata: el nitrógeno

El N disponible a la siembra junto con el N mineralizado del suelo y de los residuos del antecesor durante el ciclo del cultivo, constituyen las principales fuentes nitrogenadas que determinan el rendimiento en cultivos sin fertilizar (**Fig. 2**).

Para evaluar la disponibilidad de N inicial se recomienda el muestreo de suelo a la siembra del cultivo en los estratos superficiales (0-20 cm) y subsuperficiales (20-50 o 20-40 y 40-60 cm). No obstante, en años o regiones con excesos hídricos durante la pre-siembra del cultivo y/o con bajas temperaturas, es conveniente realizar el muestreo de suelo en el estadio de 4 o 5 hojas. Se han propuestos distintos umbrales de disponibilidad de N a la siembra ($N_{\text{suelo}_{0-60\text{cm}}} + N_{\text{fertilizante}}$) que varían desde 125 kg N/ha para alcanzar 7 t/ha de rendimiento hasta 250 kg N/ha para 14 t/ha.

El N mineralizado de la materia orgánica durante el ciclo de crecimiento del cultivo puede estimarse a partir de la determinación del N anaeróbico (N_{an}). El diferente potencial de mineralización que existe entre lotes -o ambientes dentro de un mismo lote- debido al manejo previo y/o los efectos de tipo suelo, se refleja en este índice. El muestreo de N_{an} puede realizarse en cualquier época del año y solo en el estrato 0-20 cm. En función de más de 5000 muestras analizadas por FERTILAB para el sudeste bonaerense, el valor promedio de N_{an} fue de 60 ppm, con un 25% de los lotes con valores menores a 45ppm y mayores a 75 ppm. En general, para el cultivo de maíz el aporte de N por mineralización es de 3.0 a 4.2 kg N/ha por cada ppm de N_{an} , valor que varía según zona, fecha de siembra y textura del suelo.

El aporte de N por mineralización desde el residuo del cultivo antecesor se puede estimar a partir de información local. En general, se esperan aportes de N de antecesores leguminosas como soja o coberturas como vicia y, aportes nulos o inmovilización de N, con residuos voluminosos de antecesores de gramíneas de alta relación C/N como trigo, cebada y avena. Los valores pueden ir desde inmovilizaciones (competencia con el cultivo) de N de 60 kg/ha hasta mineralizaciones (aportes al cultivo) de 100 kg N/ha.

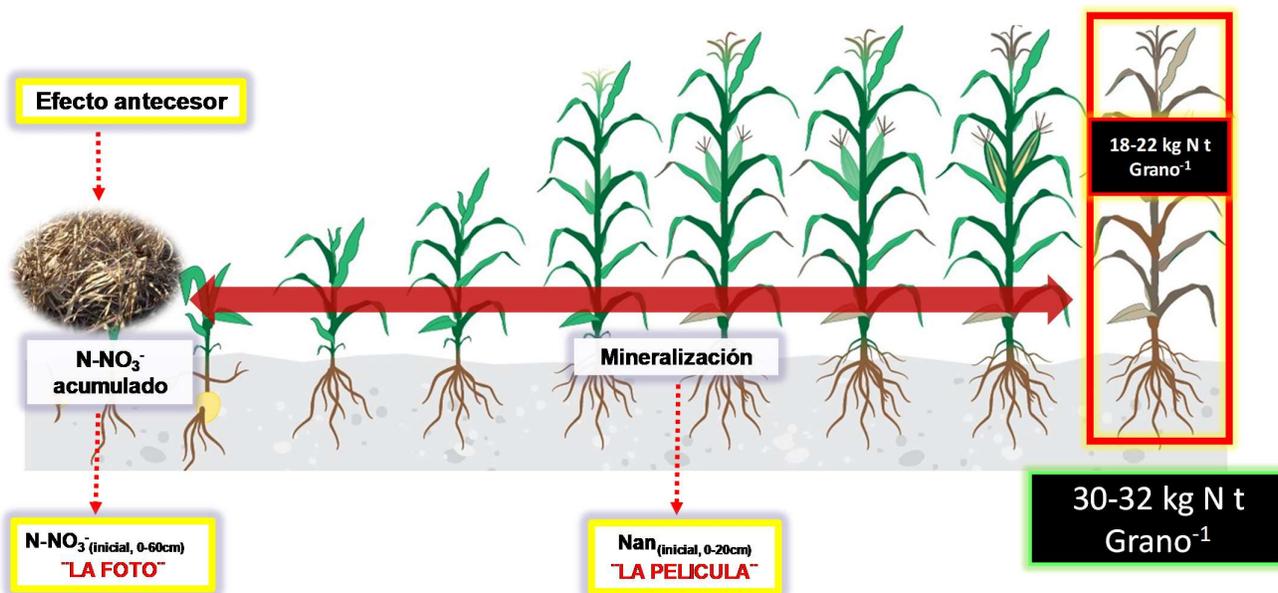


Figura 2. Abastecimiento de N del sistema para un cultivo de maíz sin fertilizar: N de residuo de antecesores, N disponible en el suelo a la siembra y N mineralizado de la materia orgánica a lo largo del ciclo del cultivo.

Para producir 1 tonelada de maíz, el cultivo necesita absorber aproximadamente 18-22 kg de N. Considerando una eficiencia de recuperación de N del sistema del 60%, se necesitan 30-32 kg de N en el suelo para producir 1 tonelada de maíz (**Fig. 2**). De la misma manera, necesitamos aplicar 30-32 kg de N como fertilizante por cada tonelada de rendimiento que queremos producir por sobre el cultivo sin fertilizar. No obstante, los mismos pueden variar entre 20 y 40 kg N en función de la eficiencia de absorción del N del suelo y potencial del ambiente.

La **Fig. 3** muestra un ejemplo de determinación de la dosis de N a aplicar para un cultivo de maíz en el sudeste bonaerense con un rendimiento objetivo de 10000 kg/ha en un suelo con 60 kg N/ha según análisis de Nitrato a la siembra a 0-60 cm, N_{an} de 50 ppm y antecesor neutro (sin aporte de N de residuos). Con el abastecimiento de N del sistema, el cultivo podría alcanzar 7000 kg/ha de rendimiento, para llegar a 10000 kg/ha se necesitarían aplicar 90 kg/ha de N como fertilizante (30 kg/ha de N en el sistema por tonelada de grano producida).

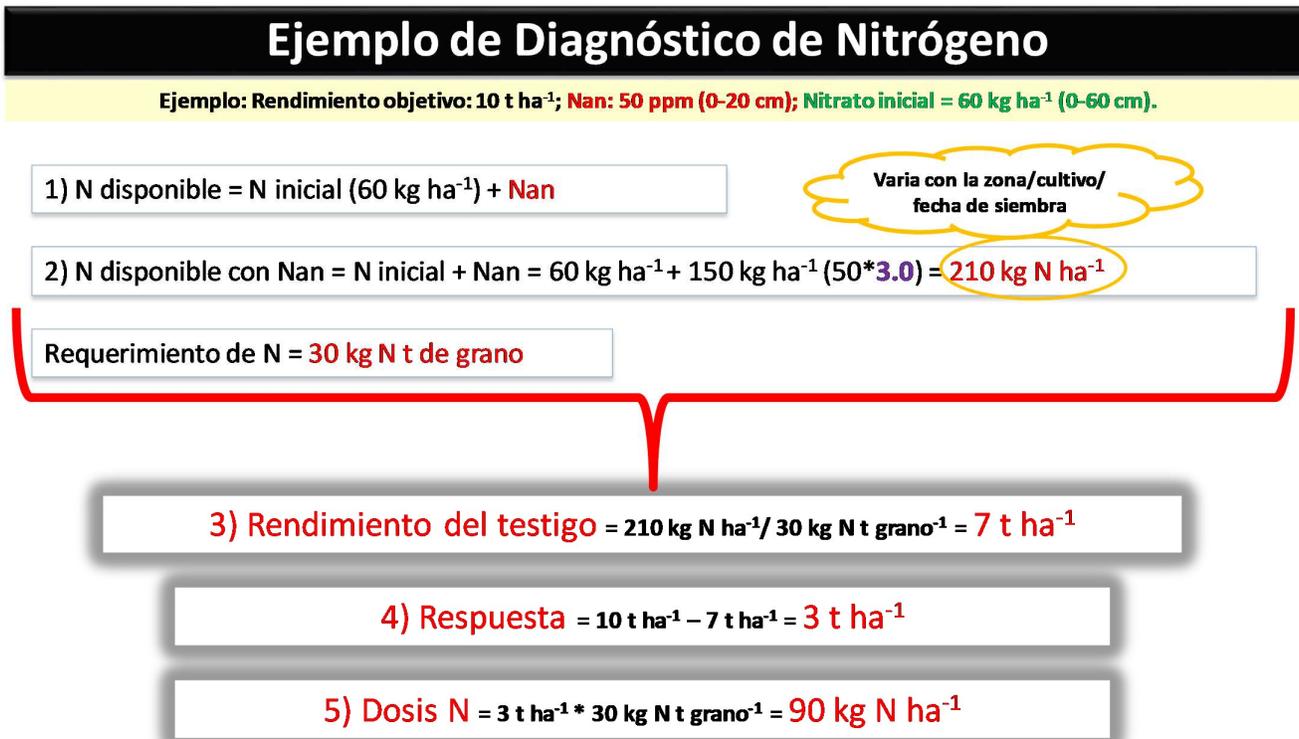


Figura 3. Ejemplo de estimación de recomendación de fertilización nitrogenada en maíz para el sudeste bonaerense utilizando la información de N disponible a la siembra, N anaeróbico (N_{an}), y rendimiento objetivo.

Dada la dinámica del N, en la actualidad, existe una amplia gama de sensores de vegetación (de refractancia o transmitancia) o incluso imágenes satelitales de alta resolución los cuales permiten caracterizar, de forma rápida y no destructiva, el estatus nitrogenado durante el ciclo del cultivo. Dentro de estos, el medidor de clorofila SPAD 502 y el sensor remoto Green Seeker son los más difundidos. Ambas herramientas podrían ser empleadas para el monitoreo del estatus nitrogenado del maíz entre 10 a 14 hojas. Para el sudeste bonaerense, se desarrolló un modelo que permite estimar la dosis óptima económica de nitrógeno en función del índice de suficiencia de N (ISN = valor de SPAD del lote/ valor de SPAD de la franja saturada con N) (**Fig. 4**). Estas herramientas son de mayor utilidad en años donde mejora la expectativa de rendimiento o con excesos hídricos pos-fertilización.

En regiones productoras de maíz que se caracterizan por tener una alta probabilidad de excesos hídricos desde la siembra hasta seis u ocho hojas, es factible considerar el fraccionamiento de la dosis de N con el objetivo de maximizar el rendimiento y la eficiencia de uso de N. Por otra parte, en ambientes de alto potencial de rendimiento y/o cultivos bajo riego, las aplicaciones hasta estadios reproductivos podrían ser una alternativa promisoría para corregir potenciales deficiencias de N. Además, es válido recordar que los híbridos modernos de maíz absorben post-floración hasta un 40% del total del N requerido a madurez fisiológica, lo cual ampliaría la ventana de aplicación de dicho nutriente en ambientes sin restricciones hídricas.

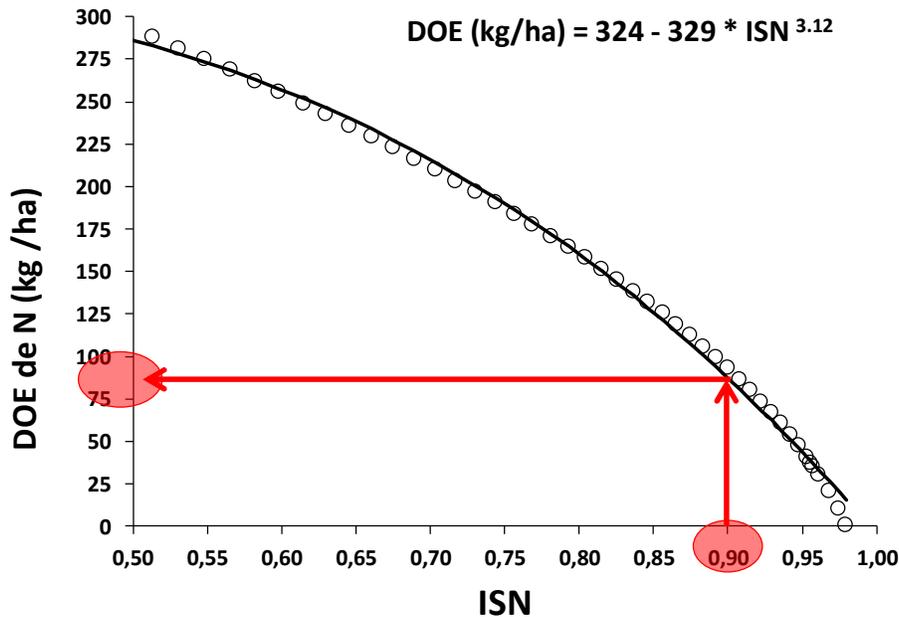


Figura 4. Relación entre la dosis óptima económica de N y el ISN (= valor de SPAD del lote/ valor de SPAD de la franja sin limitaciones de N) determinados en el estadio de 10-12 hojas del maíz. Fuente: Grupo Relación Suelo-Cultivo (Unidad Integrada Balcarce).

El fósforo, la base para los altos rendimientos

La recomendación de fertilización fosfatada se basa en el diagnóstico de fertilidad a partir del análisis de suelo del P extractable (P Bray) a 0-20 cm. Para maíz es ideal ubicarse por arriba del rango crítico de P Bray de 9-12 ppm, el cual varía según la textura de los suelos (**Fig. 5**).

La recomendación a partir del análisis puede orientarse a satisfacer las necesidades del cultivo, también llamada *Suficiencia*, o a mejorar/mantener los niveles de P Bray del suelo, *Reconstrucción* y *Mantenimiento*. La **Tabla 1** muestra recomendaciones generales sugeridas para distintos niveles de P Bray del suelo y según el rendimiento objetivo:

- Las dosis de *Suficiencia* sugeridas dependen del nivel de P Bray y consideran solo el cultivo de maíz siguiente.
- Las dosis de *Reconstrucción* y/o *Mantenimiento* buscan elevar niveles bajos a 20 ppm y mantener niveles altos de P Bray (entre 20 y 30 ppm). En este caso se estima que para subir 1 ppm de P Bray se requiere aplicar 3 kg de P por arriba de la remoción de grano de los cultivos (**Tabla 1**), pero este valor varía entre 2.5 y 4 kg P por ppm P Bray. Para reponer el P removido en granos se estima una concentración de 2.6 kg P por tonelada de grano (**Tabla 1**), y este valor también varía entre 2.2 y 3.0 kg P/t grano.

Las recomendaciones sugeridas en la **Tabla 1**, además de depender el nivel de P Bray y rendimiento, variarán de acuerdo a la relación de precios fertilizante/grano, el capital disponible y la percepción frente al riesgo.

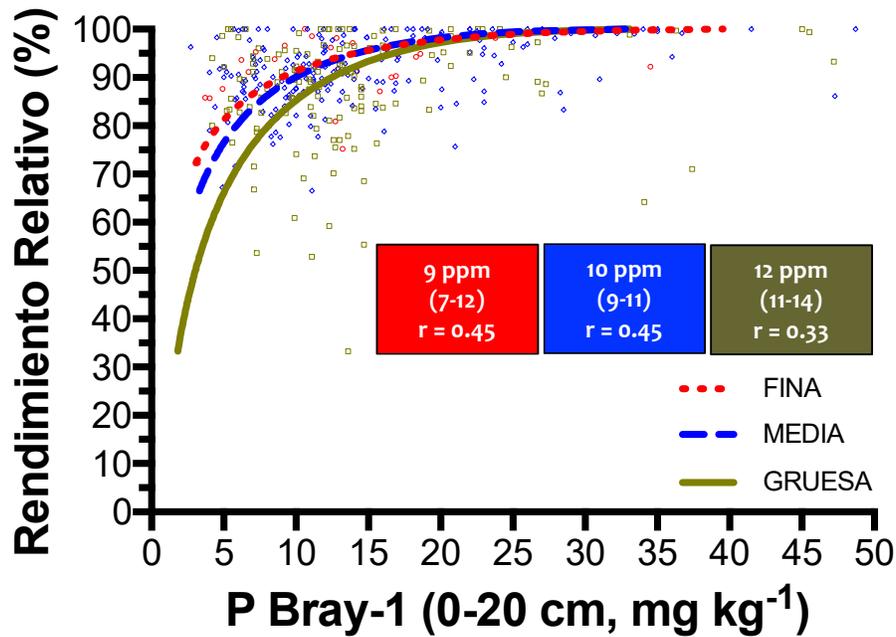


Figura 5. Rendimiento relativo de maíz en función del nivel de $P_{\text{Bray-1}}$ (0-20 cm) a la siembra. Los valores de los recuadros indican el nivel crítico de $P_{\text{Bray-1}}$ para obtener 90% del rendimiento relativo y su intervalo de confianza al 95% según textura de los suelos (Fina: Argiudoles Vérticos, Media: Argiudoles Típicos y Gruesa: Hapludoles). n= 377 ensayos en región pampeana entre 1980 y 2016. Fuente: Correndo y col. (2018).

Tabla 1. Recomendaciones sugeridas de fertilización fosfatada para maíz según niveles de P extractable (ppm P Bray, 0-20 cm) y rendimiento objetivo (t/ha).

Nivel de P extractable (P Bray 0-20 cm)	Dosis de suficiencia (kg P*/ha)	Dosis de reconstrucción y/o mantenimiento (kg P*/ha)
Menor de 10 ppm	15-20	$((20 - P \text{ Bray}) * 3 \text{ kg P/ppm}) + (t/\text{ha} * 2.6 \text{ kg P/t})$
10-15 ppm	10-15	$((20 - P \text{ Bray}) * 3 \text{ kg P/ppm}) + (t/\text{ha} * 2.6 \text{ kg P/t})$
15-20 ppm	8-10	$((20 - P \text{ Bray}) * 3 \text{ kg P/ppm}) + (t/\text{ha} * 2.6 \text{ kg P/t})$
20-25 ppm	-	$(t/\text{ha} * 2.6 \text{ kg P/t})$
25-30 ppm	-	$(t/\text{ha} * 2.6 \text{ kg P/t})$
Más de 30 ppm	-	No fertilizar, muestrear año siguiente

*Para transformar de P a P_2O_5 multiplicar por 2,29.

A modo de ejemplo, supongamos un lote con 9 ppm P Bray y un rendimiento objetivo de 10000 kg/ha:

- Dosis de *Suficiencia* sugerida sería de 20 kg P/ha.

- Dosis de *Reconstrucción y/o Mantenimiento*:

$$\text{Dosis P} = ((20 - 9) * 3) + (10 \text{ t/ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$$

$$\text{Dosis P} = (33 \text{ kg P/ha}) + (32 \text{ kg P/ha})$$

$$\text{Dosis P} = 65 \text{ kg P/ha}$$

En el caso de *Reconstrucción y/o Mantenimiento* lo recomendado es aportar los kg de P de reconstrucción a lo largo de 3-6 años de manera de reducir las cantidades aplicadas por cultivo. Esto reduce el costo financiero y la posibilidad de que se produzca un consumo excesivo de P (*consumo de lujo*). En el ejemplo anterior, los 33 kg P de reconstrucción se podrían aplicar en dosis sucesivas de 11 kg P/ha en tres años.

Respecto a la *forma de aplicación de P*, existen varios trabajos que han demostrado, para suelos con bajo nivel de P Bray y/o para dosis bajas de fertilización, una mayor eficiencia de la aplicación en la línea respecto al voleo. Las diferencias entre sistemas de aplicación es menor cuando mayor es el nivel de P Bray del suelo o la dosis de P aplicada. Las aplicaciones al voleo anticipadas alcanzan eficiencias similares a la aplicación en línea con P Bray de 10 ppm o mayor y con dosis de 20 kg/ha de P o mayores. Son especialmente útiles en planteos de *Reconstrucción y/o Mantenimiento* que generalmente utilizan dosis de fertilización altas.

El plus del azufre

La deficiencia de S se ha generalizado en numerosos sistemas de maíz. La principal reserva de S del suelo es la materia orgánica, al igual que la de N y una gran parte del P. El diagnóstico se basa en identificar los lotes deficientes a partir de las siguientes observaciones:

- Caracterización del ambiente.
 - Suelos con bajo contenido de materia orgánica, suelos arenosos.
 - Sistemas de cultivo más intensivos, disminución del contenido de materia orgánica.
- Análisis de S-sulfato: Nivel crítico menor de 7 ppm (0-20cm).
- Presencia de napa o uso de riego: Frecuentemente las napas y las aguas de riego pueden contener altos niveles de sulfato. Algo similar se observa en suelos con tosca por acumulación de sulfato.
- Balances de S en el sistema: Buscar balances neutros o levemente positivos.

Para la región pampeana, trabajos realizados por INTA han determinado un umbral crítico a la siembra del cultivo de 40 kg S ha⁻¹ (0-60 cm) (**Fig. 6a**). Además, para el sudeste bonaerense, el Nan podría contribuir a identificar lotes con problemas de S siendo el nivel crítico de 55 ppm (**Fig. 6b**). Asimismo, el análisis de grano puede ser empleado para caracterizar el estatus azufrado que tuvo el cultivo, y programar la fertilización para los cultivos subsiguientes en la rotación. Al igual que para N, la aplicación de S puede realizarse a la siembra o en estadios avanzados del cultivo debido a la absorción demorada de dicho nutriente.

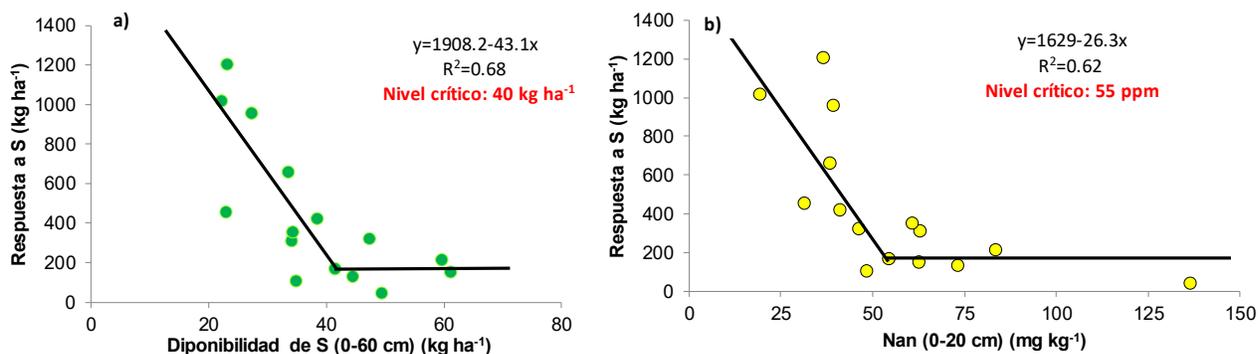


Figura 6. Rendimiento relativo de maíz en función de: a) S-sulfato y b) Nan en presiembra. Fuente: W. Carciochi-Grupo Relación Suelo-Cultivo (Unidad Integrada Balcarce).

Caja 1: ¿Qué hay de nuevo viejo?

En los últimos años, en toda la región pampeana, se han incrementado los casos de deficiencias de **Zn** en maíz, con respuestas de rendimiento que oscilan entre 5% y 10%. Se ha calibrado el análisis de suelo en presiembra de Zn-DTPA (0-20 cm), con alta frecuencia de respuesta a la aplicación con valores menores de 1 mg/kg. En cuanto a la tecnología de fertilización, las respuestas se observan tanto con aplicaciones al suelo de mezclas sólidas (químicas o físicas) y con líquidos, o en tratamientos de semillas y foliares.

Análisis de granos: ¿Monitoreo final?

Conocer la concentración de nutrientes en el grano puede indicarnos si hicimos un manejo correcto de la nutrición del cultivo. Por ejemplo, por debajo de 1.2% N se pierde más del 5% de rendimiento en grano de maíz. Se han sugerido las siguientes concentraciones de nutrientes en grano para cultivos de maíz sin limitaciones nutricionales:

<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>S</i>	<i>B</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
----- % -----						----- ppm -----				
1.2	0.25	0.34	0.02	0.14	0.11	4	3	38	27	23

¿Conviene fertilizar? ¿Los números dan?

Los niveles de **EFICIENCIA** más frecuentes de uso de los nutrientes en la región pampeana varían de 15 a 25 kg grano por kg de N aplicado; de 25 a 65 kg grano por kg de P y 45 a 95 kg grano por kg de S en ambientes con deficiencias de nutrientes. El **COSTO** (kg grano necesarios para pagar un kg de nutriente) varía históricamente entre 6 y 12 kg/kg para N, de 16 a 24 kg/kg para P y de 6 a 10 kg/kg para S. Esto evidencia la **RENTABILIDAD** de la práctica de fertilización, aún sin considerar el efecto residual de cada nutriente. Además, considerando los niveles actuales de extracción de los distintos nutrientes mencionados, la residualidad en el suelo, sobre todo de P y de S, y el reciclaje a través de los residuos de cosecha, es fundamental empezar a manejar la fertilización en función del balance de nutrientes dentro de la rotación para una agricultura sustentable.

Para una correcta fertilización es fundamental efectuar un muestreo cuidadoso de suelo y ajustar la recomendación teniendo en cuenta no solo los resultados de análisis de suelo sino también otros elementos que hacen al manejo y rendimiento del cultivo.