

USO DEL INDICE DE VERDOR PARA DETERMINAR LA DOSIS OPTIMA ECONOMICA DE NITROGENO EN MAÍZ

HERNÁN R. SAINZ ROZAS^{*1-2}; NAHUEL I. REUSSI CALVO¹⁻² & PABLO A. BARBIERI¹⁻²

Recibido: 22/1/2019
Recibido con revisiones: 12/6/2019
Aceptado: 18/6/2019

RESUMEN

En regiones con excesos hídricos al comienzo de la estación de crecimiento, la aplicación de nitrógeno (N) en estadios tempranos del maíz no es la mejor estrategia para maximizar la eficiencia de uso de dicho nutriente. El medidor de clorofila Minolta SPAD® 502 podría ser utilizado para monitorear el estatus nitrogenado y estimar el déficit o exceso de N respecto a la dosis óptima económica (dDOE) durante la estación de crecimiento del cultivo. Se evaluó la utilidad del clorofilómetro SPAD 502 para monitorear el estatus nitrogenado del maíz y definir la dDOE para tres relaciones insumo/producto (18:1; 10:1 y 5:1). Se realizaron 14 experimentos de fertilización nitrogenada en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense (SEB). Se determinó el índice de verdor (IV) al estadio de 6 y 10 hojas (V6 y V10) y se calculó el ISN (cociente entre IV de un determinado tratamiento y el de la máxima dosis). El dDOE se calculó como la dosis de N aplicada menos la DOE. El ISN se asoció con la dDOE en V6 y V10, siendo el r^2 mayor para V10 (0,44 a 0,59 vs 0,71 a 0,73, respectivamente). En V10, se ajustó un único modelo para las relaciones de precios de 10:1 y 5:1 ($ISN = 0,98 + 5e^{-5} \times dDOE - 3,9e^{-6} \times dDOE^2$; $r^2 = 0,68$), el cual difirió del ajustado para la relación 18:1 ($ISN = 0,97 + 5,4e^{-4} \times dDOE - 3,7e^{-6} \times dDOE^2$; $r^2 = 0,73$). El valor de ISN para una $dDOE = 0$ fue de 0,97 y 0,98 para el primer y segundo modelo, respectivamente. Se concluye que el ISN determinado con el clorofilómetro permite calcular la dDOE en cultivos de maíz creciendo bajo diferentes escenarios productivos, facilitando la toma de la decisión de aplicar N durante la estación de crecimiento. Esto contribuiría a minimizar las pérdidas de N y el potencial impacto ambiental negativo de la fertilización.

Palabras clave: Sensores de canopeo, nutrición nitrogenada.

USE OF GREENNESS INDEX TO DETERMINE THE OPTIMAL ECONOMIC RATE OF NITROGEN IN MAIZE

ABSTRACT

In regions with water excess at the beginning of the growing season, the application of nitrogen (N) in early stages of corn is not the best strategy to maximize the use efficiency of this nutrient. The chlorophyll meter Minolta SPAD could be used to monitor the nitrogen status and estimate the deficit or excess of N with respect to the optimal economic dose (dOED) during the crop growing season. The utility of chlorophyllometer Minolta SPAD® 502 was evaluated to monitor the maize nitrogen status and define the dOED using three price ratios (18, 10 y 5 kg maize grain kg fertilizer). Fourteen no-till maize experiments of N fertilization were carried out in the southeastern Buenos Aires (SEB). The greenness index (IV) was determined at the stage of 6 and 10 leaves (V6 and V10) and the ISN (ratio between IV of a given treatment and that of the maximum N rate) was calculated. Nitrogen deficit or excess respect to OED (dOED) was calculated as the N rate minus OED. The ISN was associated with dOED in V6 and V10 but the r^2 was higher for V10 (0,44 to 0,59 vs. 0,71 to 0,73, respectively). In V10, a single model was adjusted for 10:1 and 5:1 price ratios ($ISN = 0,98 + 5e^{-5} \times dOED - 3,9e^{-6} \times dOED^2$; $r^2 = 0,68$), which differed from the adjusted for 18:1 ratio ($ISN = 0,97 + 5,4e^{-4} \times dOED - 3,7e^{-6} \times dOED^2$; $r^2 = 0,73$). The ISN value for $dOED = 0$ was 0,98 and 0,97 for 10:1 and 18:1 price ratios, respectively. These results shown that ISN determined with SPAD 502 chlorophyllometer allows to determine dOED for maize across different production conditions, and make possible take in-season N dose decisions. This would help to minimize N losses, increase N use efficiency and reduce environmental impact of N fertilization in no-till maize.

Key words: Conopy sensors, nitrogen nutrition

1 Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce. Ruta 226 km 73,5. CC 276 (B7620/EMA). Balcarce, Buenos Aires. Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

* Autor de contacto: sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en la región pampeana Argentina. Dicho nutriente debe estar bien provisto en cantidad y oportunidad como para asegurar un óptimo estado fisiológico del cultivo durante el período crítico (PC), esto es, 15 días antes a 15-20 días después de floración (Andrade *et al.*, 2002). A nivel país, la productividad del cultivo de maíz es un 40% inferior respecto al rendimiento potencial en secano (Aramburu Merlos *et al.*, 2015). La fertilización nitrogenada explicaría aproximadamente un 50% de dicha brecha, dado que la dosis promedio aplicada a nivel país varía de 60 a 70 kg N ha⁻¹ (Fertilizar, 2018).

La eficiencia de absorción o recuperación de N (ERN) en cereales estimada a nivel mundial es de aproximadamente el 33%, lo que además de afectar el ambiente, causa una pérdida económica de 15,9 billones de US\$ (Raun & Johnson, 1999). La sincronización entre oferta y demanda de N es clave para el logro de una elevada ERN, para lo cual el adecuado diagnóstico de la disponibilidad de N edáfico es uno de los factores más importantes. La aplicación del N durante los períodos de máxima demanda del cultivo (V6 a floración) también es otro factor que contribuye marcadamente al logro de una elevada ERN; ya que de esta manera se minimizan las pérdidas del mismo desde el sistema suelo (Mueller *et al.*, 2017).

Para el cultivo de maíz se ha propuesto el empleo del análisis de nitrato en suelo al momento de la siembra o de seis hojas (V6; Ritchie & Hanway, 1982) más un índice de mineralización (N-NH₄⁺ producido en incubaciones anaeróbicas de 7 días, i.e, Nan), como metodología para evaluar la disponibilidad de N (Sainz Rozas *et al.*, 2008; Orcellet *et al.*, 2016). No obstante, esta metodología explica una proporción variable ($r^2 = 0,26-0,69$) del rendimiento de cultivos de maíz sin N, y/o de la respuesta al agregado del mismo (Orcellet *et al.*, 2016). Esto podría deberse al efecto que tienen las variables edafoclimáticas y de manejo sobre procesos que regulan la demanda de N del cultivo y las pérdidas y ganancias del mismo

desde el sistema suelo (lavado, desnitrificación y mineralización e inmovilización).

Los suelos del sudeste bonaerense (SEB) tienen elevados contenidos de materia orgánica (MO) (Sainz Rozas *et al.*, 2011) y potencial de mineralización, pero las temperaturas son subóptimas para dicho proceso durante las etapas iniciales del cultivo, particularmente en siembra directa (Domínguez *et al.*, 2001; Orcellet *et al.*, 2016). En dicha zona también es altamente probable que ocurran excesos hídricos al comienzo del ciclo cultivo que pueden generar pérdidas del N edáfico o del fertilizante (Sainz Rozas *et al.*, 2004). Además, para dicha región, también es frecuente que se produzcan deficiencias hídricas durante el PC de fijación de granos (fines de diciembre a mediados de enero), las cuales, dependiendo de su intensidad y duración, afectan el rendimiento y la demanda de N (Calviño & Monzon, 2009).

Las aplicaciones de N en estadíos posteriores a V6 muestran iguales o mayores rendimientos que aplicaciones tempranas (siembra a V6), pero en general mayores valores de eficiencia de uso del N (EUN) (Sainz Rozas *et al.*, 1999; Mueller *et al.*, 2017; Bonelli *et al.*, 2018). Además, se informó que la aplicación de N se podría retrasar hasta el estadío de 11 hojas desarrolladas (V11) sin que el rendimiento sea afectado, aun cuando severos estrés de N se manifestaron durante los primeros estadíos del cultivo (Scharf *et al.*, 2002). Si el diagnóstico se realiza en estadíos más cercanos al PC, el mismo tendría la ventaja de permitir una mejor evaluación de la conveniencia o no de re-fertilizar con N según el contenido de agua en el suelo, el pronóstico de lluvias a corto plazo y la relación insumo-producto).

Este panorama plantea la necesidad de contar con metodologías de diagnóstico no destructivas basadas en el análisis de planta que permitan corregir aplicaciones tempranas de N (siembra y V6), ya que la planta es un mejor integrador de los procesos que regulan la oferta y demanda de N. Existe una amplia gama de sensores de transmitancia y refractancia que permiten caracterizar, de forma rápida

y no destructiva el estatus nitrogenado del cultivo. Uno de los más difundidos es el medidor de clorofila Minolta SPAD® 502. Este se basa en la estrecha relación que existe entre la intensidad del color verde (IV) y el contenido de clorofila, y entre esta última y la concentración de N en hoja (Waskom, 1996). El IV presenta el inconveniente de estar afectado por numerosos factores tales como el genotipo, el estado de crecimiento del cultivo, las enfermedades, otros nutrientes y la disponibilidad hídrica (Blackmer & Schepers, 1995; Schepers *et al.*, 1996; Hawkins *et al.*, 2007). Por lo tanto, para minimizar los errores ocasionados por dichos factores se recomienda relativizar las mediciones de SPAD con áreas de referencia sin limitaciones de N, para de este modo calcular el índice de suficiencia de N (ISN) (Hawkins *et al.*, 2007; Barker & Sawyer, 2010; Reussi Calvo *et al.*, 2015). Estos últimos autores informaron una elevada relación entre el ISN y el déficit o exceso de N respecto de la dosis óptima económica (dDOE).

El ISN permite un adecuado diagnóstico del estatus nitrogenado del maíz, particularmente luego de V6 (Sainz Rozas & Echeverría, 1998; Scharf *et al.*, 2006), lo cual puede ser explicado por los bajos requerimientos de N hasta dicho estadio y porque ISN reflejaría mejor el potencial de mineralización de N del suelo cuando más se retrasa la medición. Sin embargo, se ha informado que existe interacción entre el grado de estrés hídrico y la concentración de N en hoja sobre el IV en hojas de maíz, dado que el aumento del IV ante incrementos de la concentración de N en hoja es menor en situaciones de estrés hídrico (Schepers *et al.*, 1996). Esto podría determinar variaciones importantes en la relación entre el ISN y la dDOE en zonas donde exista una marcada variación interanual de las precipitaciones durante el PC.

Otra variable que puede afectar la relación entre el ISN y la dDOE es el costo del fertilizante y el precio del grano. En Argentina, dicha relación puede variar de 5 a 18 kg grano por kg de N (Paganí *et al.*, 2008). No obstante, dichos autores también concluyeron que la DOE, calculada desde la relación entre rendimiento y N disponible

en suelo, varió en mayor medida por el potencial del ambiente (disponibilidad de agua) que por la variación de la relación insumo/producto. Esto sugeriría que la relación entre ISN y DOE sería poco afectada por la relación insumo/producto, y de este modo, podría utilizarse un único modelo de predicción con relativa independencia de la relación de precios, facilitando su adopción por los productores.

En la actualidad, no hay registros de trabajos que evalúen la relación entre el ISN y la DOE para un set de datos que incluya años, variabilidad en la disponibilidad de N edáfico y condiciones de manejo (riego-secano), ante escenarios con relaciones insumo/producto variables. Esta información sería de utilidad para el monitoreo y la aplicación de N en dichos estadios avanzados del cultivo, lo que contribuiría a incrementar la ERN en zonas como el SEB.

El objetivo de este trabajo fue realizar calibraciones entre el ISN medido con el clorofilómetro Minolta SPAD-502 y la dDOE para diferentes momentos del ciclo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre las campañas 1995/96 y 2012/13 se realizaron 14 experimentos de fertilización nitrogenada en maíz bajo siembra directa en el SEB (desde 34°41' S, 58°27' W a 38°23' S, 58°40' W) en lotes con diferente historia agrícola. Esta área se caracteriza por una temperatura media anual de 13,8°C y una precipitación media de 870mm (Calviño *et al.*, 2003). Los tipos de suelos predominantes fueron Argiudoles Típicos o Petrocálculos, con una textura superficial franca.

En todos los experimentos el diseño fue en bloques completos aleatorizados con 3 a 4 repeticiones y la dosis aplicada varió con el sitio pero siempre se utilizaron cuatro o más dosis de N. La fuente de N utilizada fue urea (46-0-0) y se aplicó al voleo en cobertura total a la siembra o en una o dos hojas totalmente expandidas (V1-V2). El tamaño de la unidad experimental fue de 4 m de ancho por 12 a 15 m de largo. Se aplicó a la siembra una dosis de 20 kg ha⁻¹ de fósforo y 20 kg ha⁻¹ de azufre para que no limiten el crecimen-

to. Se sembraron híbridos de ciclo intermedio adaptados a la zona y las fechas de siembras fueron entre el 15 de octubre y el 10 de noviembre. Las densidades de siembra variaron entre 70.000 y 80.000 plantas ha⁻¹ y se controlaron malezas con herbicidas recomendados. En ningún experimento se realizó aplicación de fungicidas. En algunos experimentos (1, 2, 3, 5 y 9) se aplicó riego suplementario durante el período crítico y la lámina de riego varió de 100 a 220 mm.

A la siembra del cultivo se realizaron muestreos de suelo en superficie (0-20 cm) para determinar el contenido de MO, pH y Nan, y en el perfil (0-20, 20-40 y 40-60 cm) para N-NO₃⁻. La MO se determinó por el método Walkley & Black (1933) y el pH en relación 1:2,5 (suelo-agua). El Nan se determinó según la metodología descrita por Echeverría *et al.* (2000). El NO₃⁻ se extrajo con KCl y la concentración de N-NO₃⁻ se determinó por colorimetría (Keeney & Nelson, 1982). Para determinar la disponibilidad de N-NO₃⁻ en los primeros 60 cm se utilizó una densidad aparente promedio de 1,26 Mg m⁻³ (Fabrizzi *et al.*, 2005). Se calculó el N disponible (ND) como la suma entre la disponibilidad de N-NO₃⁻ en los primeros 60 cm y la dosis de N del fertilizante para un determinado tratamiento. Los datos de estas variables por experimento son presentados en la **Tabla 1**.

Durante el ciclo del cultivo, se realizaron mediciones con SPAD en los estadíos de V6 y V10 de la última hoja completamente expandida, tomando la lectura de 20 plantas por parcela a la mitad de la distancia entre la base y el ápice, y a la mitad de la distancia entre el borde y el nervio medio. Para cada momento, se calculó el ISN como el cociente entre IV de un determinado tratamiento y el IV promedio del tratamiento sin limitaciones de N (máxima dosis de cada experimento). En madurez fisiológica se cosecharon las parcelas de forma manual (10 m²) y se trillaron empleando una trilladora estacionaria. Se determinó el rendimiento (expresado al 14,5% de humedad).

Las diferencias entre tratamientos sobre la variable rendimiento fue evaluada mediante análisis de la varianza (ANOVA) y las diferencias entre medias de tratamiento se evaluaron usando el Test

de Tukey ($P < 0,05$). Además, algunas variables fueron evaluadas por regresión. En cada experimento se ajustó el modelo de respuesta a N que presentó el mayor valor de r^2 y el menor cuadrado medio del error (CME). Cuando el r^2 fue similar entre dos modelos de respuesta se optó por el cuadrático-plateau (CP), dado que es el más racional desde el punto de vista agronómico (Pagani *et al.*, 2008; Barker & Sawyer, 2010). Para cada sitio se determinó la DOE como la derivada primera de la relación entre rendimiento y dosis de N, utilizando para ello tres relaciones insumo:producto: 5:1, 10:1 (más frecuentes) y 18:1 (la más desfavorable). Para sitios sin respuesta al agregado de N la DOE fue igual a 0. El dDOE se calculó como la diferencia entre la dosis de N aplicada y la DOE (Hawking *et al.*, 2007; Reussi Calvo *et al.*, 2015). Valores de dDOE negativos indican deficiencia y positivos excesos de N. Para el ajuste del modelo entre el ISN y la dDOE, el set de datos original ($n = 74$) fue dividido en forma aleatoria en dos sub-sets: 70% fue empleado para correr el modelo ($n = 52$) y el 30% para la validación entre los ISN observados y estimados ($n = 22$). Para el modelo de validación se testeó la igualdad de la ordenada al origen y la pendiente a cero y uno, respectivamente, mediante pruebas de F para un nivel de significancia del 5%. Una adecuada estimación de los datos observados a partir de los estimados debe proveer un modelo con pendiente uno, ordenada al origen cero y un elevado valor de r^2 (Hunt & Boote, 1998). El paquete estadístico utilizado en todos los casos fue el entorno computacional R (R Development Core Team, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las precipitaciones y los riegos realizados en general no limitaron el rendimiento del cultivo y la respuesta a N, salvo en los sitios 4 y 14. Las precipitaciones ocurridas durante el PC en dichos sitios fueron de 55 y 148 mm; valores inferiores al de 180 mm informado por Calviño *et al.* (2003), el cual se asocia a la obtención del máximo rendimiento de maíz en secano en suelos sin limitantes de profundidad.

Los valores promedio de pH, MO, Nan en el estrato superficial (0-20 cm) y N-NO₃⁻ (0-60 cm) mos-

Tabla 1. Algunas características de los suelos de los sitios experimentales determinadas en presiembra.**Table 1.** Some characteristics of the soils of the experimental sites determined before sowing.

Sitio	pH	P-Extractable*	MO [†]	Nan [‡]	N-NO ₃ [‡]
		(0-20 cm)	(0-20 cm)	(0-20 cm)	(0-60 cm)
		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹
1	5,8	21	56	41	33
2	5,8	23	56	41	33
3	5,7	22	56	41	45
4	5,4	9	55	74	77
5	5,6	16	49	71	76
6	5,9	26	57	63	60
7	5,7	12	56	59	45
8	5,6	12	52	76	92
9	5,8	13	56	71	56
10	6,1	9	50	107	89
11	6,1	17	54	43	84
12	5,7	15	65	71	113
13	5,6	13	56	49	137
14	5,6	10	46	44	114
Promedio	5,7	16	55	61	75
Desvió	0,2	5	4	19	32
Mínimo	5,4	9	46	41	33
Máximo	6,1	26	65	107	137

* Método Bray & Kurtz (1945); [†] Materia orgánica (Walkey & Black, 1933);[‡] N-NH₄⁺ producido en anaerobiosis (Echeverría et al., 2000); [‡] Keney & Nelson (1982).

trados en la **Tabla 1** se ubicaron dentro de los rangos reportados para la zona por otros autores (Sainz Rozas *et al.* 2011; Orcellet *et al.*, 2016; Reussi Calvo *et al.* 2018). La variación del contenido inicial de N-NO₃⁻ y de Nan (potencial de mineralización) sugieren que la DOE presentaría variabilidad entre experimentos, debido a que ambas variables edáficas se asocian con el rendimiento de cultivos de maíz sin N y/o con la respuesta al agregado del mismo (Orcellet *et al.*, 2016).

El rendimiento varió de 4163 a 14035 kg ha⁻¹ según sitio y dosis de N, mientras que la respuesta para las máximas dosis aplicadas en cada sitio varió de - 751 a 7131 kg ha⁻¹ (**Tabla 2**). En el Sitio 4 y 10 no se determinó respuesta al agregado de dicho nutriente. En el primero, el severo estrés hídrico registrado durante el PC no permitió

la expresión de la respuesta; mientras que la falta de respuesta en el sitio 10 se debería al elevado valor de Nan del suelo (**Tabla 1** y **2**), dado que esta variable se asocia positivamente con la mineralización aparente y negativamente con la respuesta a N (Orcellet *et al.*, 2016; Reussi Calvo *et al.*, 2018). La DOE promedio fue de 167, 132 y 86 kg ha⁻¹ para la relación de precios de 5:1, 10:1 y 18:1, respectivamente; con un valor mínimo de 0 y un máximo de 238 kg ha⁻¹, dependiendo de la relación de precios y del sitio. En este sentido, el contenido de N-NO₃⁻, el Nan y el rendimiento máximo (Rmax) de cada sitio explicaron parte de la variación de la DOE (DOE= 173 - 0,76*N-NO₃⁻ - 1,68*Nan + 0,01*Rmax; r²= 0,40).

Tabla 2. Efecto de la dosis de N sobre rendimiento en grano del maíz en los diferentes sitios experimentales.**Table 2.** Effect of N rate on maize grain yield at different experimental sites.

Experimento	Dosis de N (kg ha ⁻¹)												
	0	35	40	60	70	80	120	140	160	180	200	210	240
1	6.904d	8.623c	-	-	10.385b	-	-	12.955a	-	-	-	14.035a	-
2	6.747c	-	-	-	9.315b	-	-	9.840b	-	-	-	10.971a	-
3	7.298b	-	-	-	-	10.707a	-	10.822a	-	11.802a	-	-	-
4	6.214a	-	-	5.995a	-	-	4.464a	-	-	5.969a	-	-	5.463a
5	8.358c	-	-	9.351bc	-	-	10.906ba	-	-	11.847a	-	-	11.960a
6	8.200b	-	-	9.138ab	-	-	9.610a	-	-	9.941a	-	-	10.105a
7	6.460c	-	-	8.096cb	-	-	9.393ab	-	-	10.656a	-	-	10.791a
8	6.460c	-	-	8.096bc	-	-	9.394ab	-	-	10.791a	-	-	11.171a
9	6.422c	-	-	8.049bc	-	-	9.339ab	-	-	10.594a	-	-	10.728a
10	13.261a	-	-	14.460a	-	-	13.020a	-	-	12.917a	-	-	13.611a
11	6.410b	-	7.068ab	8.252ab	-	9.278ab	9.335ab	-	-	9.685a	-	-	-
12	6.101d	-	6.397d	-	-	7.942cd	9.446ab	-	9.696ab	-	10.734a	-	-
13	9.964a	-	9.726a	-	-	10.131a	10.829a	-	10.762a	-	10.383a	-	-
14	4.160c	-	4.851c	-	-	6.734b	7.365b	-	8.831a	-	8.880a	-	-

Letras distintas en cada fila indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre dosis de N según el test de Tukey.

Para el estadio de V6, el ISN se relacionó con el ND mientras que en V10 el ISN se relacionó con el ND y en menor medida con el Nan, siendo el ajuste del modelo mayor para este último estadio (**Tabla 3**). El menor ajuste determinado en V6 se explica principalmente por los bajos requerimientos de N que presenta el cultivo hasta dicho estadio (Bender *et al.*, 2013), mientras que el mayor ajuste determinado en V10 es debido al mayor requerimiento de N del cultivo y a que el ISN determinado en dicho estadio es un mejor estimador de la cantidad de N derivado del suelo y/o del fertilizante que va a estar disponible durante toda la estación de crecimiento (Scharf *et al.*, 2006). Los cambios temporales en la disponibilidad de N derivado del suelo y/o del fertilizante con el avance del ciclo del cultivo son debidos a una mejor exploración radical, menores pérdidas de N del sistema suelo (desnitrificación y lavado) y a una mayor mineralización por aumentos de la temperatura del suelo (Sainz Rozas *et al.*, 2004; Sainz Rozas *et al.*, 2008; Orcelet *et al.*, 2016). En síntesis, los resultados sugieren que en el estadio V10 la planta fue capaz de captar la variación en la disponibilidad de N generada por el $N-NO_3^-$ inicial, el N del fertilizante y el N aportado por la mineralización.

Tabla 3. Modelos para estimar el índice de suficiencia de N en los estadios de crecimiento del maíz de V6 (ISN_{V6}) y en V10 (ISN_{V10}).

Table 3. Models to estimate N sufficiency index at V6 (ISNV6) and V10 (ISNV10) maize growth stages.

Modelo	Variable	Valor parámetro	p valor	R ² parcial	Raj ²
ISN _{V6}	Intercepto	0,89			0,32
	ND	4,1 e ⁻⁴	0,001	0,32	
ISN _{V10}	Intercepto	0,73			0,70
	ND	1,90 e ⁻³	0,001	0,48	
	ND ²	-3,70 e ⁻⁶	0,001	0,15	
	Nan	4,50 e ⁻⁴	0,001	0,07	

ND= nitrógeno disponible a la siembra ($N-NO_3^-$ kg ha⁻¹ hasta 60 cm más dosis de N del fertilizante). Nan= $N-NH_4^+$ producido en anaerobiosis (mg kg⁻¹, 0-20 cm).

Se ajustó un modelo CP entre el ISN y la dDOE para cada momento de determinación del ISN (V6 y V10) y las diferentes relaciones de precios (Fig.

1). La dDOE explicó desde un 44 a un 59% de la variación del ISN en V6 y desde un 71 a 73% en V10 (**Figura 1**). La pendiente (incremento del ISN por kg de dDOE⁻¹) también fue mayor en V10, indicando que el estrés de N se incrementó con el avance del ciclo del cultivo. Por lo tanto, a pesar que la dDOE logró explicar un adecuado porcentaje de la variación del ISN en V6, el mismo tiene menor sensibilidad que el determinado en V10 ante cambios en la dDOE (**Figura 1**). Estos resultados están en línea con los informados para maíz por Scharf *et al.* (2006). Por lo tanto, si el ISN es determinado en V6 existe una mayor posibilidad de cometer errores en la prescripción de N.

Para V10, los ajustes determinados entre el ISN y la dDOE son similares a los informados por otros autores para estadios de V10 a V13 (Scharf *et al.*, 2006; Hawkins *et al.*, 2007; Varvel *et al.*, 2007; Barker & Sawyer, 2010). Además, el ISN asociado a la dDOE = 0 fue de 0,98 para relaciones de precios de 10 y 5:1; y de 0,97 para la relación 18:1 (**Figura 1**). Es importante destacar que el elevado ajuste determinado en V10 ocurrió a pesar de que en algunos sitios (4 y 14) la respuesta a N estuvo limitada por agua. En dichos sitios el ISN fue elevado para todas las dosis de N y la dDOE fue muy baja o cero, lo que sugiere que el estrés hídrico registrado durante el PC afectó más a la demanda de N por el cultivo que a la oferta edáfica del mismo. Otros autores también han informado un buen ajuste entre el ISN (medido desde V10 a V13) y la dDOE en ambientes con variabilidad de la disponibilidad de agua durante el PC (Scharf *et al.*, 2006; Hawkins *et al.*, 2007; Varvel *et al.*, 2007; Barker & Sawyer, 2010).

Se ajustó un único modelo para predecir el ISN con la dDOE para relaciones de precio de 5:1 y 10:1 (las más frecuentes), dado que para dichas relaciones los parámetros de las ecuaciones de ajuste entre el ISN y la dDOE no difirieron ($p \geq 0,05$) (**Figura 1y 2**). Se determinó una elevada relación entre el ISN y la dDOE ($r^2 = 0,68$) lo posibilita usar este modelo para las relaciones de precios más frecuentes (5 y 10:1) (**Figura 2**). Esto facilitaría la adopción de esta metodología de diagnóstico para realizar correcciones durante el ciclo del cultivo, dado que permitiría relativa independencia de las oscilaciones de precios

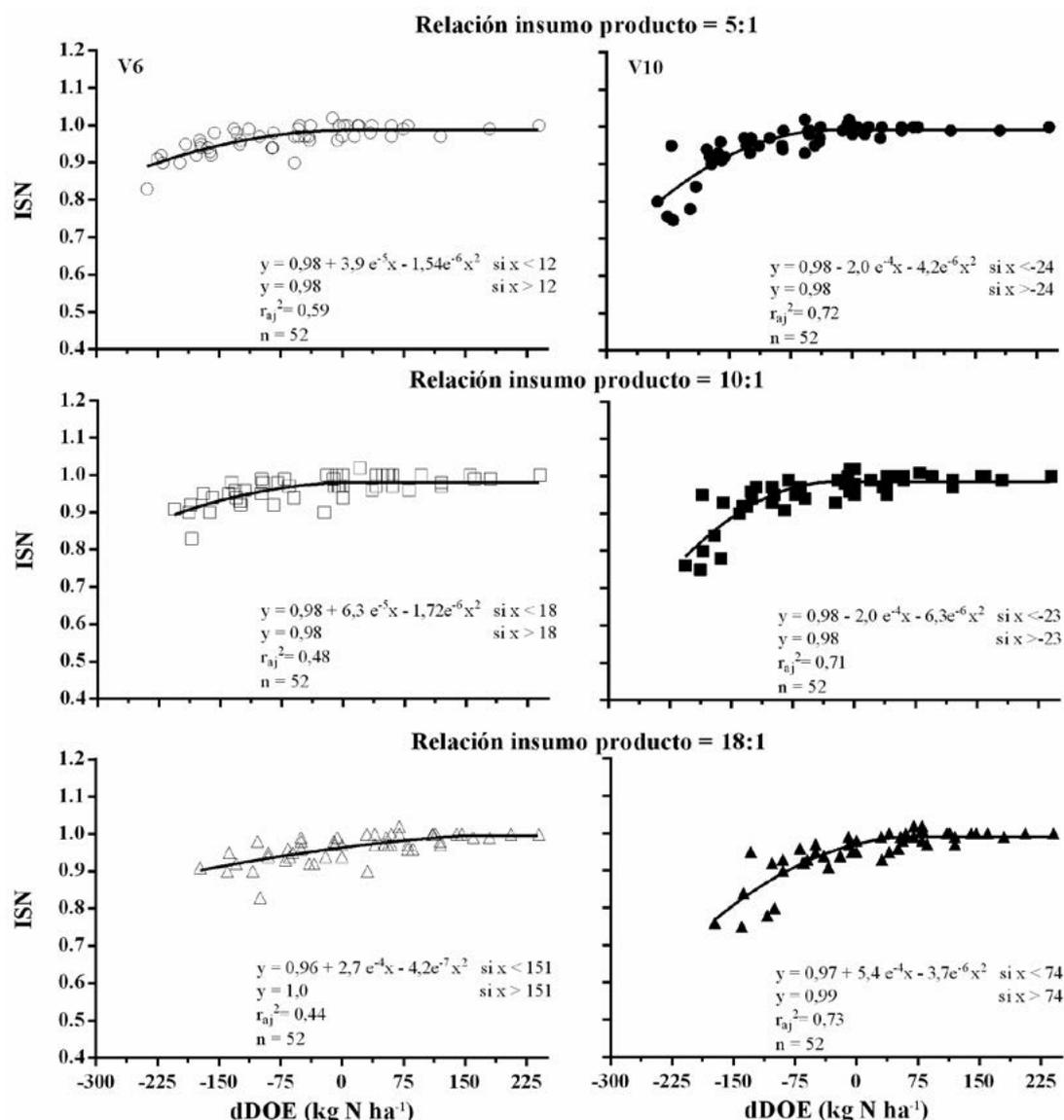


Figura 1. Relación entre el índice de suficiencia de N (ISN) del cultivo de maíz y la diferencia de N a la dosis óptima económica (dDOE) para los estadios de crecimiento de 6 y 10 hojas expandidas (V6 y V10, respectivamente), y para diferentes relaciones de precios de N y grano. Valores de dDOE negativos y positivos indican deficiencia y exceso de N, respectivamente.

Figure 1. Nitrogen sufficiency index (ISN) of maize crop at the V6 and V10 maize growth stage as related to N rate difference from the economic optimum nitrogen rate (dDOE) for different ratio of fertilizer cost and maize grain price. Negative and positive values indicate deficit and excess nitrogen, respectively.

del grano de maíz y del fertilizante. Además, cuando se validó dicho modelo, se determinó una elevada relación entre el ISN observado con el estimado a partir del modelo de la **Figura 2** ($r^2=0,66$), siendo la ordenada al origen y la pendiente no diferentes ($p \geq 0,05$) de cero y uno, respectivamente (**Figura 3**).

Para similares relaciones insumo/producto, Hawkins *et al.* (2007) y Barker & Sawyer

(2010), trabajando en la región centro a centro-norte de EEUU, informaron valores de ISN similares a los del presente estudio, particularmente para el rango de dDOE de -50 a 0 kg N ha^{-1} (**Figura 4**).

Estos resultados sugieren una elevada confiabilidad del ISN determinado con el clorofímetro para corregir deficiencias de N durante la estación de crecimiento.

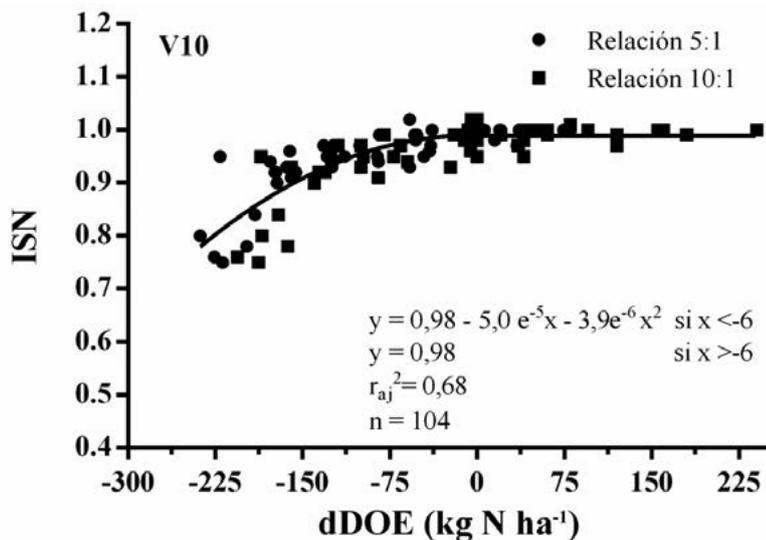


Figura 2. Relación entre el índice de suficiencia de N (ISN) del cultivo de maíz y la diferencia de N a la dosis óptima económica (dDOE) para el estadio de crecimiento del maíz de 10 hojas expandidas (V10), y para la relación de precios de N y grano de 10 y 5:1. Valores de dDOE negativos y positivos indican deficiencia y exceso de N, respectivamente.

Figure 2. Nitrogen sufficiency index (ISN) of maize crop at V10 growth stage as related to the nitrogen rate difference from the economic optimum nitrogen rate (dDOE), and for ratio of fertilizer cost and maize grain price of 10 and 5:1. Negative and positive values indicate deficit and excess nitrogen, respectively.

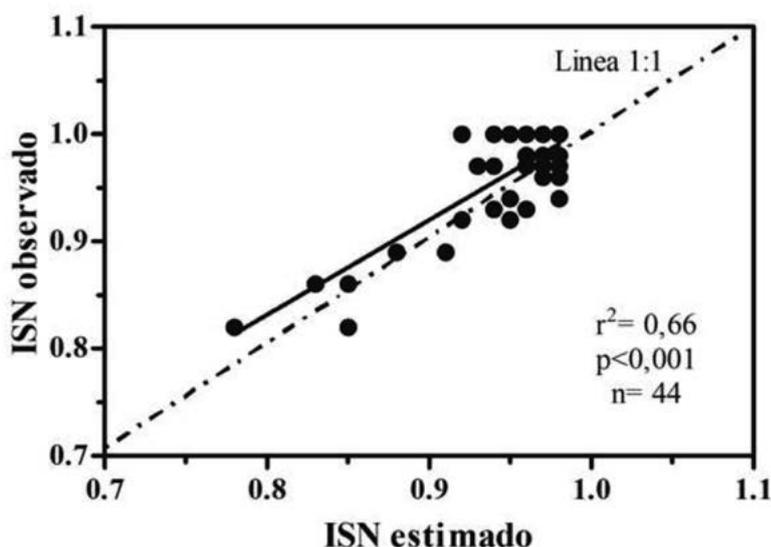


Figura 3. Relación entre los índice de suficiencia de N (ISN) observados para la relación insumo:producto de 5:1 y 10:1 en el estadio de V10 y los valores estimados con el modelo de la Figura 2.

Figure 3. Relationship between the observed nitrogen sufficiency index (ISN) for the input:product ratio of 5: 1 and 10: 1 at V10 growth stage and the estimated values with the model of Figure 2.

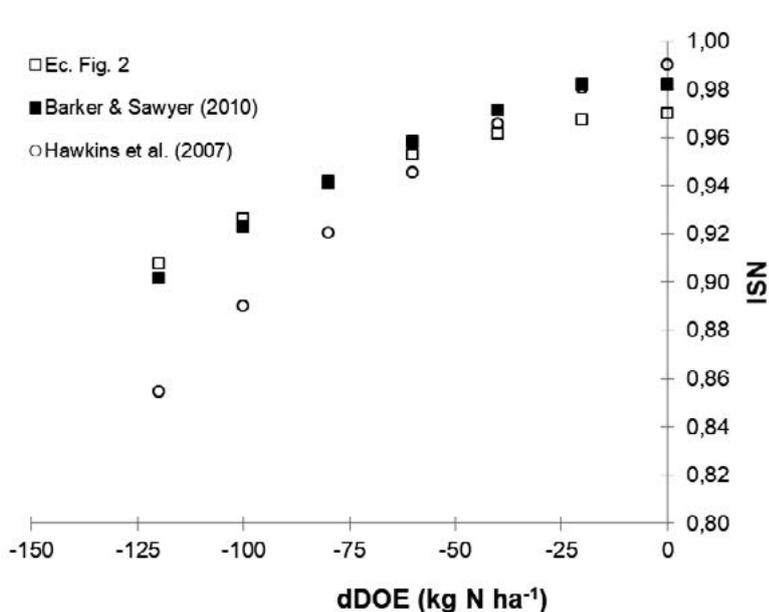


Figura 4. Índice de suficiencia de N (ISN) en función de la diferencia de N a la dosis óptima económica (dDOE) para el estadio de 10 hojas expandidas calculadas con la ecuación de la Figura 2 (Ec. Fig. 2), y con ecuaciones informadas por Hawkins *et al.* (2007) y Barker & Sawyer (2010).

Figure 4. Nitrogen sufficiency index (ISN) as a function of the difference of N to the optimal economic dose (dDOE) at V10 growth stage calculated with the equation of Figure 2 (Eq. Fig. 2), and with equations reported by Hawkins *et al.* (2007) and Barker and Sawyer (2010).

En síntesis, para el cultivo de maíz se han ajustado modelos que relacionan el rendimiento de cultivos sin N o la respuesta al agregado de este nutriente con el N-NO₃⁻ inicial y el Nan (Orcellet *et al.*, 2016). Por lo tanto, una estrategia para incrementar la EUN en cultivos sería la determinación de la dosis de N según estos modelos y la aplicación de la misma en V4-V6 con posterior chequeo y eventual re-fertilización en V10 según el valor de ISN medido. Eventualmente, esta ventana se podría ampliar hasta el estadio de V13, dado que ha sido informado que el estrés de N hasta dicho estadio no afecta el rendimiento potencial respecto de cultivos sin estrés de N desde el comienzo del ciclo (Scharf *et al.*, 2002). Este último manejo sería más aplicable en cultivos bajo fertirrigación.

CONCLUSIONES

La determinación del ISN en V6 no resultó una herramienta promisoría para el monitoreo de las necesidades de N dado que se asoció de forma débil con la variación de la disponibilidad de N edáfico y con la dDOE. Sin embargo, la determinación del ISN en V10 reflejó de manera adecuada la disponibilidad de N edáfico y se asoció de forma estrecha con la dDOE, aun cuando se registraron variaciones en la oferta de N de los suelos y en la demanda de N del cultivo. Los valores de umbrales de ISN no se modificaron para las relaciones de precios de fertilizante y grano más frecuentes. La determinación del ISN y la eventual re-fertilización en V10 permitirían maximizar la productividad del cultivo y la EUN, reduciendo el potencial impacto ambiental negativo de la práctica de fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con subsidios del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Proyecto PNSUELO-1134024), FON-CyT (Proyecto PICT 2016-0304), del laboratorio de suelos del grupo relación Suelo-Cultivo de la EEA INTA Balcarce y del laboratorio de suelos FERTILAB.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, FH; HE Echeverría; NS González & SA Uhart. 2002. Requerimientos de nutrientes minerales. *En*: HE Echeverría & FO García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Pp. 211-237. Ediciones INTA.
- Aramburu Merlos, F; JP Monzon; JL Mercauc; M Taboada; FH Andrade; AJ Hall; E Jobbagy, KG Cassman & P Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crop Res* 184: 145-154.
- Barker, DW. & JE Sawyer. 2010. Using Active Canopy Sensors to Quantify Corn Nitrogen Stress and Nitrogen Application Rate. *Agron J* 102:964-971.
- Bender, RR; JW Haegerle; ML Ruffo & FE Below. 2013. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. *Agron J* 105: 161-170.
- Blackmer, TM & JS Schepers. 1995. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J Prod Agric* 8:56-60.
- Bonelli, LE; H Sainz Rozas; HE Echeverría & PA Barbieri. 2018. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo* 36: 88-98.
- Calviño, PA; FH Andrade & VO Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron J* 95: 275-281.
- Calviño, P. & Monzon, J.P. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. *In*: VO Sadras & D Calderini (eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Pp. 55-67. Academic Press, Elsevier.
- Domínguez, GF; GA Studdert; HE Echeverría & FH Andrade. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del Suelo* 19: 47-56.
- Echeverría, HE; N San Martin & R Bergonzi. 2000. Métodos rápidos de estimación del nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ciencia del Suelo* 18:9-16.
- Fabrizzi, K.P., F.O. García, J.L. Costa, and L.I. Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res* 81:57-69. doi:10.1016/j.still.2004.05.001.
- Fertilizar. 2018. Consumo de fertilizantes en todos los cultivos en la campaña 2016/17. Fertilizar Asociación Civil. https://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468del
- Hawkins, JA; JE Sawyer; DW Barker & JP Lundvall. 2007. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. *Agron J* 99: 1034-1040.

- Hunt, LA & KJ Boote. 1998. Data for Model Operation, Calibration and Evaluation. In: Tsuji, GY; G Hoogenboom & PK Thornton (eds.). Understanding Options for Agricultural Production. Pp 9-40. Kluwer Academic Publishers/ ICASA, Dordrecht.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: AL Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Pp 643-698. Agron Monog 9 ASA and SSSA, Madison, WI.
- Mueller, SM; JJ Camberato; C Messina; J Shanahan; H Zhang & TJ Vyn. 2017. Late-split nitrogen applications increased maize plant nitrogen recovery but not yield under moderate to high nitrogen rates. *Agron J* 109: 2689-2699.
- Orcellet, J; NI Reussi Calvo; HR Sainz Rozas; N Wyngaard & HE Echeverría. 2016. Anaerobically Incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in Corn. *Agron J* 109: 1-8.
- Pagani, A; HE Echeverría; H Sainz Rozas & PA Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26:183-193.
- Raun, WR & GV Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron J* 91:357-363.
- Reussi Calvo, NI; H Sainz Rozas; HE Echeverría & N Diovissalvi. 2015. Using Canopy Indices to Quantify the Economic Optimum Nitrogen Rate in Spring Wheat. *Agron J* 107: 1-7.
- Reussi Calvo, NI; N Wyngaard; JM Orcellet; H Sainz Rozas & HE Echeverría. 2018. Predicting Field Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Sci Soc Am J* doi:10.2136/sssaj2017.11.0395.
- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Iowa, EEUU. Special Report N°48. pp. 24.
- Sainz Rozas HR, HE Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (minolta spad 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Rev de la Fac de Agron de la Plata* 103: 37-44.
- Sainz Rozas HR, HE Echeverría, GA Studdert, FH Andrade. 1999. No-tillage corn nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time. *Agron J* 91: 950-955.
- Sainz Rozas, HR; P Calviño; H Echeverría, PA Barbieri y M Redolatti. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agron J* 100: 1020-1025.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & HP Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29: 29-37.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & PA Barbieri. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agron J* 96: 1622-1631.
- Scharf, PC; WJ Wiebold & J Lory. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agron J* 94: 435-441.
- Scharf, PC; SM Brouder & RG Hoefl. 2006. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the North - Central USA. *Agron J* 98: 655-665.
- Schepers, JS; TM Blackmer; WW Wilhelm & M Resende. 1996. Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply. *J Plant Physiol* 148: 523-529.
- Varvel, GE; WW Wilhelm; JF Shanahan & JS Schepers. 2007. An Algorithm for Corn Nitrogen Recommendations Using a Chlorophyll Meter Based Sufficiency Index. *Agron J* 99:701-706.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci* 63: 251-263.21.
- Waskom, R. M. 1996. A review of use of chlorophyll meters to assess crop N status in the Great Plains. Proceedings Great Plains Soil Fertility Conference. J. Havlin (ed.). Kansas State University, Manhattan, KS, EEUU. pp. 36 - 43.